

NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH MA SÁT CỦA LỚP PHỦ GỒM $Al_2O_3 - TiO_2$ ĐƯỢC TẠO BỞI PHƯƠNG PHÁP PHUN PLASMA

STUDY ON FRICTION CHARACTERISTICS OF PLASMA-SPRAYED $Al_2O_3 - TiO_2$ COMPOSITE COATINGS

Bùi Văn Khoản

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu đặc tính và kết quả tối ưu hoá hệ số ma sát của lớp phủ phun nhiệt plasma với bột phun $Al_2O_3 - TiO_2$ trên bề mặt nền thép tấm C45. Từ kết quả đó, khả năng chịu mài mòn cơ học của lớp phủ được dự báo thông qua việc cải thiện hệ số ma sát. Thiết kế thực nghiệm L9 theo Taguchi được xây dựng để nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số phun plasma gồm: dòng điện phun (I), khoảng cách phun (L), lưu lượng cấp bột phun (N) đến hệ số ma sát lớp phủ. Nghiên cứu đặc tính của hệ số ma sát khô trên lớp phủ cho thấy, khi độ cứng tăng thì hệ số ma sát có xu hướng giảm dần. Kết quả tối ưu xác định bộ thông số: $I = 600A$, $L = 130mm$, $N = 2,1 \text{ kg/h}$, là thông số phun cho hệ số ma sát nhỏ nhất với giá trị đoán là 0,49. Thực nghiệm kiểm chứng hệ số ma sát lớp phủ với thông số phun tối ưu cho kết quả hệ số ma sát là 0,51, giá trị trên hoàn toàn tương đồng với giá trị dự đoán (sai số 4,08%) chứng tỏ kết quả nghiên cứu có độ tin cậy cao, hệ số ma sát đã được cải thiện (giảm). Phân tích phương sai dựa trên các kết quả thực nghiệm đã xác định mức độ ảnh hưởng của các thông số phun đến hệ số ma sát với: $I = 80,1\% > N = 12,3\% > L = 7,6\%$. Kết quả của nghiên cứu là cơ sở xác định thông số phun phù hợp cho lớp phủ nhận được có hệ số ma sát thấp, cải thiện khả năng chịu mài mòn.

Từ khóa: Plasma; Lớp phủ $Al_2O_3 - TiO_2$; Phun plasma; Hệ số ma sát.

ABSTRACT

This paper presents the research results on the characteristics and optimization of the friction coefficient of a plasma-sprayed thermal coating with $Al_2O_3 - TiO_2$ powder on the surface of C45 steel plate. Based on these results, the mechanical wear resistance of the coatings is predicted through the improvement of the friction coefficient. L9 experimental design according to Taguchi was built to study the influence of plasma injection parameters including spray current (I), spray distance (L), and powder feed rate (N) on the friction coefficient of the coatings. The research on the dry friction coefficient of the coating indicates that as the hardness increases, the friction coefficient tends to decrease. The optimized results determined the parameter set as follows: $I = 600A$, $L = 130mm$, $N = 2.1 \text{ kg/h}$, which yielded the smallest friction coefficient with a predicted value of 0.49. Experimental verification of the friction coefficient with the optimized spraying parameters resulted in a friction coefficient value of 0.51, which closely matched the predicted value (4.08% error),

demonstrating high reliability of the research results and an improved (reduced) friction coefficient. Variance analysis based on the experimental results determined the influence level of the spraying parameters on the friction coefficient as follows: $I = 80.1\% > N = 12.3\% > N = 7.6\%$. The results of the study are the basis for determining suitable spray parameters for the received coating with low coefficient of friction and improved wear resistance.

Keywords: $Al_2O_3 - TiO_2$ coatings; Plasma spraying; Friction characteristics.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ phun phủ nhiệt plasma hiện nay được ứng dụng rộng rãi trong việc chế tạo và phục hồi các bề mặt chi tiết máy, bởi vật liệu phun sử dụng đa dạng, thích hợp với nhiều loại vật liệu phun, nhất là vật liệu có nhiệt độ nóng chảy cao. Công nghệ phun plasma có thể tạo hình lớp phủ gồm trên bề mặt chi tiết máy nhằm nâng cao độ bền, tính chống mài mòn, chịu ăn mòn, làm việc trong các môi trường khắc nghiệt như chịu áp suất cao, nhiệt độ cao, môi trường hóa chất,... Do vậy, phun plasma là giải pháp phù hợp để tạo lớp phủ gồm $Al_2O_3 - TiO_2$, bởi nhiệt độ cao của dòng plasma có thể nung chảy vật liệu phun với thành phần Al_2O_3 , tạo điều kiện tốt cho quá trình hình thành lớp phủ. Một số nghiên cứu đã thực hiện để xem xét đặc tính cũng như thông số của lớp phủ trên cơ sở thành phần Al_2O_3 đã được thực hiện với bột Ni5Al; Ni20Cr; 67Ni18Cr5Si4B và hệ gồm trên cơ sở oxit Al_2O_3 với hàm lượng khác nhau. Kết quả cho giá thành phun rẻ, đảm bảo các tính năng kỹ thuật cao của bề mặt được phục hồi với độ cứng, độ bền mài mòn cơ học, độ bền ăn mòn hóa học và chịu nhiệt độ cao. Do vậy, chúng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực sản xuất cơ khí. Một số định hướng nghiên cứu về tính năng của lớp phủ nhận được bằng công nghệ phun plasma là xác định hệ số ma sát trong một số điều kiện thử nghiệm nhất định [1] ÷ [6]. Ở Việt Nam, việc chế tạo lớp phủ gồm lên bề mặt lớp thép nền đã thu được các

kết quả khả quan nhằm mục đích bảo vệ, chống ăn mòn, chịu mài mòn cho các sản phẩm cơ khí [9] ÷ [11].

Trên cơ sở đó, nghiên cứu tiến hành nghiên cứu đặc tính ma sát, xác định ảnh hưởng của các thông số phun tới hệ số ma sát, tối ưu hoá các thông số phun để cải thiện hệ số ma sát của lớp phủ với bột phun $Al_2O_3 - TiO_2$. Các thông số phun chính được nghiên cứu gồm: dòng điện phun, khoảng cách phun, lưu lượng cấp bột phun. Thiết kế thực nghiệm Taguchi với mảng trực giao L_9 được sử dụng để xây dựng các thông số thực nghiệm [7, 8].

2. VẬT LIỆU VÀ QUÁ TRÌNH THỰC NGHIỆM

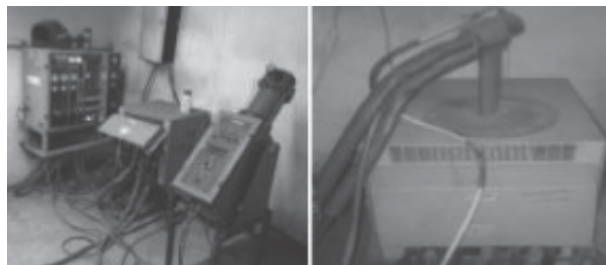
2.1. Vật liệu

Nghiên cứu sử dụng vật liệu nền là thép cacbon C45 dạng tấm có kích thước 50x50x6 mm. Vật liệu phủ là bột $Al_2O_3 - 40TiO_2$ mã hiệu P220/35 của hãng Metallisation, với cỡ bột: 45+5 μm . Sau khi cắt mẫu, ta tiến hành làm sạch và tạo nhám bề mặt bằng phương pháp phun hạt mài, sử dụng hạt corindon.

2.2. Thiết bị thực nghiệm

Hệ thống phun plasma PRAXAIR Model 3710 với đầu súng phun SG100 (Hình 1) được sử dụng để chế tạo lớp phủ gồm.





Hình 1. Hệ thống phun plasma Model 3710

2.3. Quá trình thực nghiệm

Ba thông số công nghệ phun để tiến hành thí nghiệm trong nghiên cứu này là: dòng điện phun I_p , khoảng cách phun L_p và tốc độ cấp bột N. Mỗi thông số chọn 3 mức, giá trị các mức được xác định dựa trên khuyến cáo của hãng cung cấp bột để thí nghiệm (Bảng 1).

Bảng 1. Các thông số công nghệ thí nghiệm

TT	Thông số công nghệ	Mức 1	Mức 2	Mức 3
1	I_p (A)	400	500	600
2	L_p (mm)	90	110	130
3	N (kg/h)	1.2	1.6	2.0

Bảng 2. Bảng kết quả đo hệ số ma sát

Thí nghiệm	Thông số			Giá trị hệ số ma sát ở các lần đo			Trung bình
	I (A)	L (mm)	M (kg/h)	1	2	3	
1	400	90	1.7	0.749	0.797	0.725	0.757
2	400	110	1.9	0.684	0.685	0.758	0.709
3	400	130	2.1	0.669	0.742	0.653	0.688
4	500	90	1.9	0.814	0.791	0.753	0.786
5	500	110	2.1	0.610	0.642	0.632	0.628
6	500	130	1.7	0.735	0.668	0.664	0.689
7	600	90	2.1	0.529	0.521	0.522	0.524
8	600	110	1.7	0.621	0.549	0.576	0.582
9	600	130	1.9	0.556	0.500	0.558	0.538

Các thông số phun còn lại cố định như sau:

- Tốc độ dịch chuyển đầu phun: 15 m/phút;
- Điện áp phun: 60 V;
- Áp lực khí sơ cấp: 50 l/phút;
- Áp lực khí thứ cấp: 2 l/phút;
- Áp lực khí mang bột: 5,5 l/phút;
- Chiều dày lớp phun: 0,4 mm.

Tham khảo phương pháp thực nghiệm Taguchi với 3 thông số, mỗi thông số 3 mức, ta chọn mảng trực giao L9 và tiến hành 9 thí nghiệm (phun phủ 9 mẫu) [7, 8].

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

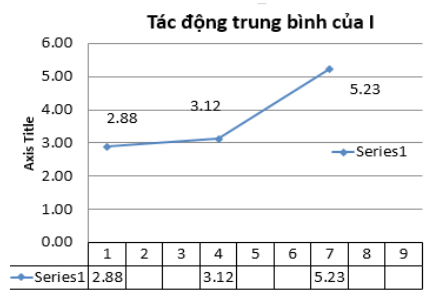
3.1. Kết quả thực nghiệm

Tác giả tiến hành đo hệ số ma sát của các mẫu phun, kết quả đo này làm cơ sở cho việc đánh giá khả năng chịu mòn cho lớp phủ và mở rộng hơn là khả năng chịu mòn cho các chi tiết máy. Việc đo cũng được thực hiện theo mảng trực giao L9 và kết quả được trình bày trong Bảng 2.

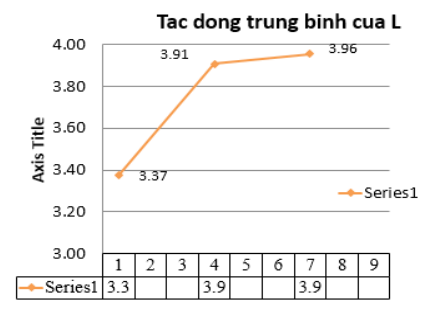
3.2. Nghiên cứu tối ưu và đánh giá ảnh hưởng các thông số phun đến hệ số ma sát của lớp phủ

Trên cơ sở kết quả đánh giá hệ số ma sát của lớp phủ như bảng 2, tiến hành tối ưu hóa các thông số phun đến hệ số ma sát của lớp phủ. Tiêu chí chất lượng nhỏ hơn thì tốt hơn được lựa chọn để tiến hành tối ưu theo Taguchi. Quá trình tính toán được thực hiện trên phần mềm Minitab 18 cho các kết quả như hình 2.

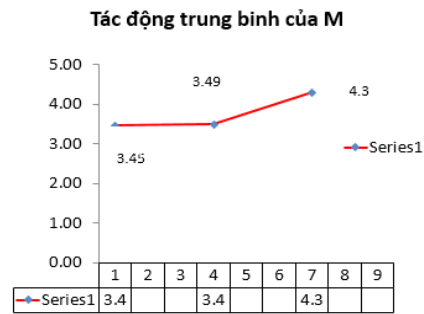
Quá trình đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số phun đến hệ số ma sát của lớp phủ, ta tiến hành phân tích phương sai, xác định tổng bình phương của các thông số phun, kết quả tính toán tối ưu cho thấy giá trị hệ số ma sát nhỏ nhất theo dự đoán là 0,49% ứng với mức thông số phun là $I_3L_3M_3$. Phần trăm ảnh hưởng của các thông số phun tới hệ số ma sát tương đối lớn với thứ tự ảnh hưởng được xác định: Dòng điện phun (80,1%) > Lưu lượng cấp bột (12,3%) > Khoảng cách phun (7,6%).



a, Ảnh hưởng của I



b, Ảnh hưởng của L

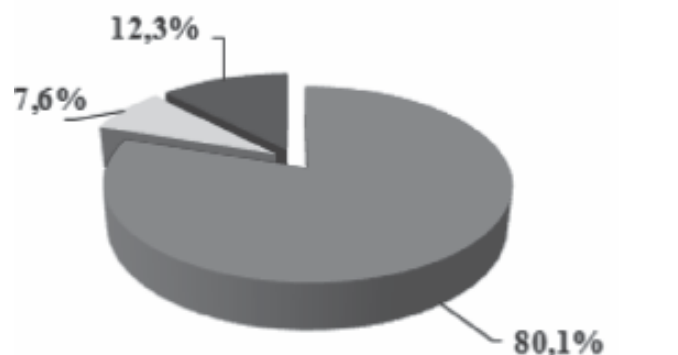


c, Ảnh hưởng của M

Hình 2. Biểu đồ phân mức tác động của các thông số I, L, M tới hệ số ma sát

Bảng 3. Phân tích ANOVA kết quả đo hệ số ma sát lớp phủ các mẫu thực nghiệm

Yếu tố	Bậc tự do	Tổng bình phương các yếu tố	Trung bình bình phương	Mức ảnh hưởng
I	2	0.053	0.026299	80.1%
L	2	0.005	0.0025	7.6%
M	2	0.008	0.004034	12.3%
Tổng	8	0.066	--	100%



Hình 3. Biểu đồ ảnh hưởng của các thông số I, L, M tới hệ số ma sát lớp phủ

Căn cứ vào đồ thị phân mức của các yếu tố, có thể nhận thấy: Với yêu cầu về đặc trưng chất lượng nhỏ hơn thì tốt hơn thì mức tối ưu của các yếu tố để có hệ số ma sát nhỏ nhất là (I_3 , L_3 , N_3), cụ thể: $I_3 = 600$ A; $L_3 = 130$ mm; $N_3 = 2,1$ kg/h. Xây dựng quan hệ toán học giữa các thông số phun tới hệ số ma sát lớp phủ.

Phương trình toán học bậc hai được tiến hành xây dựng bằng phương pháp bình phương nhỏ nhất để xây dựng mô hình hệ số ma sát lớp phủ H có dạng:

$$H = -7,6082 \cdot 10^{-6} \cdot I^2 + 9,6476 \cdot 10^{-5} \cdot L^2 - 0,7623 \cdot M^2 - 0,0012 \cdot I \cdot M + 0,0051 \cdot L \cdot M + 0,0092 \cdot I - 0,0327 \cdot L + 2,7972 \cdot M - 2,0411 \quad (1)$$

Sau khi tính toán tối ưu đơn mục tiêu, thu được kết quả đo hệ số ma sát tối ưu 0,49, ứng với bộ thông số phun $I_3L_3M_3$ ($I = 600$ A; $L = 130$ mm; $M = 2,1$ kg/h), tác giả tiến hành làm thí nghiệm kiểm chứng với bộ thông số trên theo trình tự sau:

- Thứ nhất: tiến hành phun mẫu với bộ thông số phun $I_3L_3M_3$, các thông số phun khác vẫn được giữ nguyên.

Bảng 4. Kết quả đo hệ số ma sát trên mẫu kiểm chứng

Chỉ tiêu	Kết quả tối ưu dự đoán theo từng tiêu chí đơn lẻ	Kết quả tính toán theo hàm nội suy	Kết quả trên mẫu kiểm chứng	Phần trăm sai lệch
Hệ số ma sát	0.49	0.495	0.510	4.08%

4. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số phun plasma tới hệ số ma sát của lớp phủ gồm hệ $Al_2O_3 - wt.40\% TiO_2$. Bằng thực nghiệm đã xác định được mối tương quan giữa hệ số ma sát vật liệu lớp phủ plasma hệ gồm $Al_2O_3 - wt.40\% TiO_2$ với bộ thông số phun phủ plasma:

1) Quá trình tối ưu hoá, với bộ thông số tối ưu $I_3L_3M_3$ sẽ cho kết quả hệ số ma sát tối ưu được dự đoán theo hàm toán học (1) là: 0,495, thí nghiệm kiểm chứng (Bảng 4), với bộ thông số trên cho kết quả 0,510 với độ sai lệch 4,08% so với giá trị dự đoán theo tiêu chí đơn lẻ. Với các giá trị đo được của hệ số ma sát có thể lựa chọn ứng dụng cho chi tiết máy chịu mài mòn cơ học phù hợp với điều kiện ma sát trên thực tiễn của máy móc thiết bị;

2) Hệ số ma sát (f) của vật liệu lớp phủ gồm này có xu hướng tăng tỷ lệ thuận cùng với chiều tăng của độ cứng trung bình ($HV_{0,1}$) trong quá trình thử nghiệm, điều đó dẫn đến có thể dự báo khả năng tăng hoặc giảm tùy theo độ xốp trung bình của nó giảm hoặc tăng tương ứng với chế độ phun plasma khi tạo mẫu phun phủ. Kết quả thí nghiệm khá phù hợp với quy luật chung do các nhà nghiên cứu ngoài nước công bố gần đây về lớp phủ gốm. ❖

Ngày nhận bài: 12/5/2023

Ngày phản biện: 10/6/2023

Tài liệu tham khảo:

- [1]. K. H. Zum Gahr, W. Bundschuh và B. Zimmerlin (1993); "Effect of grain size on friction and sliding wear of oxide ceramics", Elsevier Sequoia, Jour. Wear, 162-164, pp. 269-279.
- [2]. You Wang, Stephen Jiang, Meidong Wang,

- Shihe Wang, T. Danny Xiao, Peter R. Strutt (1999); “*Abrasive wear characteristics of sprayed nanostructured alumina / titania coatings*”, J. Wear (Elsevier):www.elsevier.com/locate/wear.
- [3]. Mokhtar Bounazef, Sofiane Guessasma*, Ghislain Montavon, Christian Coddet (2004); “*Effect of APS process parameters on wear behaviour of alumina-titania coatings*”, J. Elsevier, Materials letters, 58 (2004), pp. 2451-2455.
- [4]. Sofiane Guessasma, Mokhtar Bounazef (2004); “*Experimental Design to Study the Effect of APS Process Parameters on Friction Behaviour of alumina-Titania Coatings*”, J. Advanced Engineering Materials (6/2004), No. 11, pp.907-910.
- [5]. M. Ramazani, J. Khalil-Allafi and R. Mozaffarinia (2010); “*Grindability Evalution and Fatigue and Wear Behavior of Conventional and Nanostructured Al_2O_3 - 13 wt.% TiO_2 Air Plasma Sprayed Coatings*”, ASM International, “Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 19(3), March 2010, pp. 611-619.
- [6]. N. H. N. Yusoff, M. J. Ghazali, M. C. Isa, A. Muchtar and S. M. Forghani (2011); “*Effect of particle size and bonding layer on plasma spraed Al_2O_3 - 13% TiO_2 coatings*”, Intern. Jour. of Mechanical and Materials Engineering (JMME), Vol. 6 (2011), No.3, pp. 385-390.
- [7]. Datta S., Bandyopadhyay A., Pal P. K. (2008); *Grey-based Taguchi method for optimization of bead geometry in submerged arc bead-on-plate welding*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 39, 1136-1143. DOI: 10.1007/s00170-007-1283-6.
- [8]. Barrett, J. Douglas. *Taguchi's quality engineering handbook*. (2007): 224-225.
- [9]. Trần Văn Dũng (2012); “*Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ phun và gia công nhiệt tới độ bền bám dính lớp phun plasma*”, Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật chuyên ngành “Công nghệ tạo hình vật liệu”, Viện Nghiên cứu Cơ khí, Hà Nội.
- [10]. Lý Quốc Cường (2018); “*Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ xử lý nhiệt đến cấu trúc, tính chất của hệ lớp phủ kép nhôm và hợp kim Ni-20Cr trên nền thép*”, Luận án Tiến sĩ hóa học, Trường Đại học Công nghệ – Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Hà Nội.
- [11]. Bùi Văn Khoản, Hà Minh Hùng, Nguyễn Văn Đức (2021); “*Nghiên cứu tính chất cơ – lý vật liệu lớp phủ plasma hệ gốm Al_2O_3 – TiO_2 bằng phương pháp kim tương học*”, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 6, T6/2021.