

TỐI ƯU HÓA ĐẶC TÍNH MA SÁT HỌC CỦA LỚP PHỦ GỐM HỆ $Al_2O_3 - TiO_2$ BẰNG CÔNG NGHỆ PHUN PLASMA, ỨNG DỤNG CHO CHI TIẾT MÁY CHỊU MÀI MÒN CƠ HỌC

OPTIMIZATION OF THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF $Al_2O_3 - TiO_2$ CERAMIC COATINGS USING PLASMA SPRAYING TECHNOLOGY FOR APPLICATIONS IN MECHANICALLY WORN MACHINE COMPONENTS

TS. Bùi Văn Khoản

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

Email: buivankhoan.utehy@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu cơ sở khoa học, thực tiễn về vấn đề đặc tính lớp phủ gốm trên thế giới và ứng dụng phương pháp thiết kế thực nghiệm Taguchi để xây dựng chế độ phun plasma tạo lớp phủ gốm $Al_2O_3-40TiO_2$ nhằm nâng cao tuổi thọ làm việc của chi tiết máy thông qua hệ số ma sát của lớp phủ. Trong nghiên cứu này có ba thông số công nghệ được khảo sát, bao gồm dòng điện, tốc độ cấp bột và khoảng cách phun. Hệ số ma sát được đo trên bề mặt lớp phủ, với thiết kế thực nghiệm Taguchi đã phân tích và tìm ra được bộ thông số chế độ phun nhằm tạo ra lớp phủ có hệ số ma sát tối ưu. Các kết quả nghiên cứu được là cơ sở để thiết lập quy trình công nghệ phun phủ phục hồi các chi tiết máy chịu mài mòn ở Việt Nam, các chi tiết vẫn đang trong quá trình sử dụng và theo dõi.

Từ khóa: Lớp phủ plasma; Hệ gốm $Al_2O_3-40TiO_2$; Hệ số ma sát.

ABSTRACT

This paper presents the scientific and practical research results on the characteristics of ceramic coatings worldwide and applies the Taguchi experimental design method to establish plasma spraying parameters for producing $Al_2O_3-40TiO_2$ ceramic coatings in order to improve the service life of machine components through the coating's friction coefficient. In this study, three technological parameters were investigated, including spraying current, powder feed rate, and spraying distance. The friction coefficient was measured on the coating surface, and the Taguchi experimental design method was employed to analyze and determine the optimal spraying parameters for obtaining a coating with the desired friction coefficient. The research results provide a basis for establishing plasma coating technological processes for restoring machine components subjected to mechanical wear in Vietnam, the components are still in use and under monitoring.

Keywords: Plasma coating; $Al_2O_3 - TiO_2$ ceramic system; Friction coefficient.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khả năng chịu mài mòn là chủ đề được nhiều nhà khoa học quan tâm, có nhiều công nghệ tiên tiến được ứng dụng nhằm tạo ra các bề mặt chịu mài mòn cơ học tốt. Công nghệ phun phủ nhiệt được xem là phương pháp khá hiệu quả trong việc chế tạo mới hay phục hồi các chi tiết máy có yêu cầu đặc biệt về bề mặt, như tính chống mài mòn, chịu nhiệt và các thuộc tính đặc biệt khác [1-2]. Có nhiều nghiên cứu chỉ ra mối quan hệ về khả năng chịu mài mòn với độ cứng, độ xốp, hệ số ma sát của lớp phủ [5-6, 9-11].

Để tạo ra được lớp phủ có khả năng chịu mài mòn cao phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như: Xử lý bề mặt phun, vật liệu phun và đặc biệt là chế độ công nghệ phun.

Trong số các phương pháp công nghệ phun phủ nhiệt thì phun phủ plasma có nhiều ưu điểm. Công nghệ phun plasma, sử dụng nhiệt của dòng plasma để nung nóng vật liệu. Plasma là chất khí ở trạng thái các nguyên tử và phân tử bị ion hoá, thực chất là hồ quang kéo dài. Phun phủ plasma có công suất nhiệt lớn, cho năng suất cao, vật liệu phun đa dạng, chất lượng lớp phủ tốt [3]. Những yếu tố góp phần tạo ra chất lượng lớp phủ liên quan đến thiết bị phun, tính chất bề mặt nền, vật liệu phun, chế độ công nghệ phun... Trong các yếu tố đó thì chế độ công nghệ phun có vai trò rất quan trọng.

Vật liệu phun plasma hệ Al_2O_3 có nhiều tỷ lệ khác nhau, mỗi tỷ lệ lại cho một cơ tính khác nhau, trong nghiên cứu này lựa chọn tỷ lệ bột Al_2O_3 -40TiO₂ [7-8].

Trong các nhà máy sửa chữa, phục hồi chi tiết máy cho ngành nhiệt điện, việc áp dụng công nghệ phun phủ plasma tạo lớp phủ Al_2O_3 -

40TiO₂ nhằm phục hồi, nâng cao tuổi thọ của các chi tiết máy có thể giải quyết được những vấn đề này. Với ưu điểm công nghệ vượt trội, việc phân tích tối ưu hóa các thông số phun phủ để đưa ra được chế độ công nghệ phù hợp sẽ giúp quá trình phục hồi ra được sản phẩm tối ưu.

2. THỰC NGHIỆM CHẾ TẠO LỚP PHỦ

Thiết bị phun plasma PRAXAIR Model 3710 với đầu súng phun SG100 (Hình 1) được sử dụng trong nghiên cứu này để chế tạo lớp phủ gốm.



Hình 1. Thiết bị phun plasma Model 3710

Nghiên cứu sử dụng vật liệu nền là thép cacbon C45 dạng tấm có kích thước 50×50×6 mm. Vật liệu phủ là bột Al_2O_3 -TiO₂ mã hiệu P220/35 của hãng Metallisation, với cỡ bột -45+5μm [4].

Sau khi cắt mẫu, ta tiến hành làm sạch và tạo nhám bề mặt bằng phương pháp phun hạt mài, sử dụng hạt corindon.

Ba thông số công nghệ phun để tiến hành thí nghiệm 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	M (kg/h)	1, 2	1,6	2,0

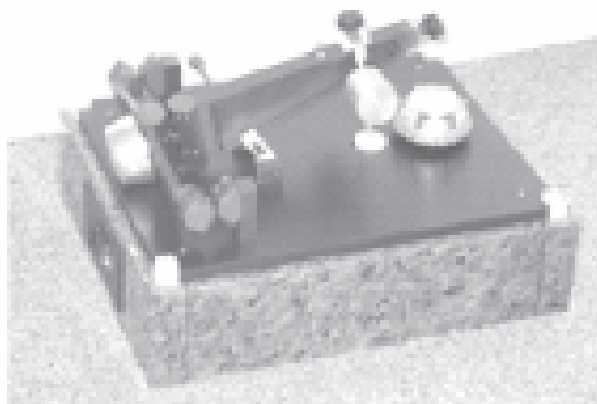
Các thông số phun còn lại cố định như sau:

- 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 L_9 và tiến hành 9 thí nghiệm (phun phủ 9 mẫu) [12].

3. KẾT QUẢ ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG LỚP PHỦ

Trên cơ sở là khả năng chịu mòn khô và mòn trượt của lớp phủ từ bột phun Al_2O_3 -40TiO₂ cùng với nguyên lý tạo mài mòn bằng một số phương pháp [5, 6]. Quá trình đo được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm Kim loại học và Nhiệt luyện - Viện Khoa học và Kỹ thuật vật liệu – Đại học Bách khoa Hà Nội. Quá trình đo hệ số ma sát không có chất bôi trơn (thử khô), lực đặt là 10 N, ở điều kiện nhiệt độ phòng.



Hình 2 Thiết bị đo hệ số ma sát (Ma sát nghi)

* Quy trình đo:

Bước 1 – Chuẩn bị mẫu:

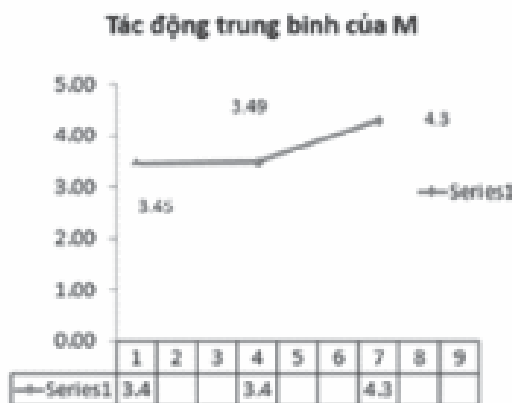
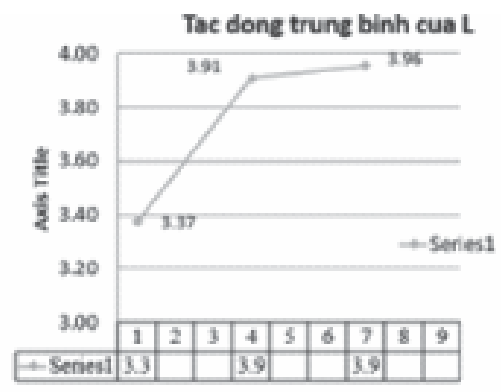
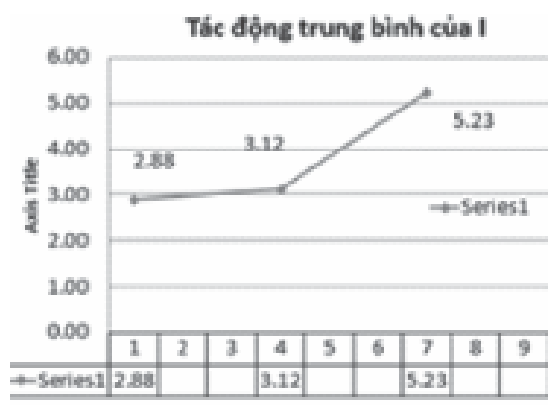
- Mẫu đo: Dạng khối, bề mặt phẳng;
- Kích thước: $\varnothing$ (20 ÷ 200) mm, dày (2 ÷ 50)mm;
- Yêu cầu: Bề mặt phẳng, cần làm sạch;
- Môi trường: Khô.

Bước 2 – Chuẩn bị đo:

- Gá mẫu trên mâm kẹp mẫu;
- Thiết bị thử nghiệm sử dụng là máy TRIBO-Tester của hãng Tribotechnic, Cộng hòa Liên bang Đức chế tạo (Hình 2). Đặc tính ma sát học của vật liệu lớp phủ này được đánh giá thông qua tiêu chí hệ số ma sát dưới chế độ tải trọng $P = 10$ N đặt tải lên đầu trụ đối ứng trong bộ đôi ma sát, môi trường thử là không khí ở 25°C, quãng đường thử $L = 200$ m, độ ẩm 80% RH, tốc độ quay của đĩa gắn mẫu thử $v = 88$ mm/s, bán kính quay $r = 6,0$ mm ghi nhận được ở các thời điểm khởi động, chạy ổn định và kết thúc thử nghiệm trong phòng thí nghiệm.

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



Hình 3. Biểu đồ phân mức tác động của các thông số I, L, M tới hệ số ma sát

Căn cứ vào kết quả trong Bảng 2, ta tiến hành phân tích phương sai cho phép đánh giá được mức tác động trung bình của mỗi thông số phun nhờ tỷ số S/N, ta xác định phân bố ảnh hưởng của thông số công nghệ phun tới hệ số ma sát của lớp phủ, kết quả được tổng hợp trong Bảng 3.

Bảng 3. Phân tích ảnh hưởng của các tham số theo phân tích phương sai ANOVA

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%

Quá trình tính toán được tiến hành tương tự như cách tính cho các tính chất khác của lớp phủ, cho kết quả như được trình bày trong Bảng 3. 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%).

Chế độ phủ tối ưu, từ đó củng cố thêm cơ sở khoa học cho việc ứng dụng phun phủ tạo lớp phủ $Al_2O_3-40TiO_2$ chịu ăn mòn mài mòn nâng cao tuổi thọ làm việc của các chi tiết máy trong nhà máy nhiệt điện Uông Bí (Bảng 4). Hình ảnh quá trình chế tạo lớp phủ được đưa ra ở Hình 4.

Sản phẩm quạt Roots đã được lắp ghép thành công vào hệ thống của Tổ máy 330 MW

và đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật để tiến hành vận hành chạy thử. Kết quả chạy thử sau 6 tháng khẳng định quạt Roots sau khi phục hồi chạy ổn định, đạt được chỉ tiêu kỹ thuật và được đơn vị sử dụng xác nhận kết quả nghiên cứu.

Bảng 4. Chế độ phun gốm $Al_2O_3-40TiO_2$ cho roto quạt Roots CHANGSHA ARF 245W

Thông số phun phủ	Giá trị
Điện áp (U_p)	40 V
Cường độ dòng điện (I_p)	600 A
Vận tốc (V_p)	100 mm/s
Khoảng cách phun (L_p)	130 mm
Tốc độ cấp bột (M)	2,1 kg/h
Lưu lượng khí Ar	50 l/phút
Lưu lượng khí H_2	1,5 l/phút

Bảng 5. Bảng kết quả đo độ cứng lớp phủ

Thí nghiệm	Thông số			Độ cứng (giá trị trung bình $HV_{0,1}$)
	I (A)	L (mm)	M (kg/h)	
1	400	90	1,7	443,8
2	400	110	1,9	464,2
3	400	130	2,1	477,0
4	500	90	1,9	441,8
5	500	110	2,1	521,4
6	500	130	1,7	541,8
7	600	90	2,1	602,0
8	600	110	1,7	523,6
9	600	130	1,9	593,2

Bảng 6. Bảng kết quả 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%



Hình 4. Quá trình phun phủ $Al_2O_3-40TiO_2$ lên roto cánh quạt Roots

4. KẾT LUẬN

Từ thực nghiệm, bài báo đã xây dựng được mối quan hệ giữa hệ số ma sát của lớp phủ $Al_2O_3-40TiO_2$ và 3 thông số công nghệ phun phủ plasma đầu vào I_p , L_p , M . Các kết quả chính thu được như sau:

- Mức các thông số công nghệ hợp lý nhằm đảm bảo tiêu chí hệ số ma sát nhỏ nhất là: $I_p = 600$ A, $L_p = 130$ mm, $M = 2,1$ kg/h.

- Các thông số công nghệ có ảnh hưởng khác nhau đến hệ số ma sát của lớp phủ, trong đó ảnh hưởng của dòng điện phun I_p là lớn nhất (80,1%); ảnh hưởng của tốc độ cấp bột M và khoảng cách phun L_p thấp hơn, kết quả kiểm chứng cho thấy độ tin cậy của những kết quả tính toán đơn lẻ. Kết quả nghiên cứu này cũng sẽ mở ra hướng nghiên cứu tiếp theo cho tác

giả, đánh giá mối quan hệ giữa lượng mòn và hệ số ma sát của lớp phủ hoặc bài toán tối ưu đa mục tiêu.

Trên cơ sở các kết quả thực nghiệm thu được đối sánh với những kết quả nghiên cứu trước đó về độ cứng lớp phủ cho thấy kết quả khá tương đồng (hệ số ma sát nhỏ thì độ cứng lớp phủ tăng (bảng 5)), kết quả này củng cố thêm cho những ứng dụng của nhóm tác giả đã ứng dụng lớp phủ gốm oxit $Al_2O_3-40TiO_2$ để phục hồi cho roto quạt Roots CHANGSHA ARF 245W và đã thu được những kết quả khả quan, những sản phẩm vẫn đang trong quá trình sử dụng và theo dõi, đánh giá của nhóm nghiên cứu. ❖

Ngày nhận bài: **05/6/2026**

Ngày phản biện: **15/6/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Văn Thông, “*Công nghệ phun phủ bảo vệ và phục hồi*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2006.
- [2]. Hoàng Tùng, “*Công nghệ phun phủ và ứng dụng*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2006.
- [3]. Vũ Minh Thành và cộng sự, “*Lớp phủ vô cơ*”. NXB. KHTN&CN, 2017.
- [4]. P222-32, Alumina oxide 60%, Titanium dioxide 40%, Metallisation, 2. 9. 12. 5. ISSUE: 1/95-12.
- [5]. Zhao, Xiaoqin, et al., “*Friction and wear behavior of plasma-sprayed Al_2O_3 -13 wt. % TiO_2 coatings under the lubrication of liquid paraffin*”. Journal of Thermal Spray Technology 23. 4 (2014): 666-675.
- [6]. Orjuela-Guerrero, Fredy Alejandro, José Edgar Alfonso-Orjuela, and Jhon Jairo Olaya-Flórez, “*Effect of V addition on the hardness, adherence and friction coefficient of VC coatings produced by thermo-reactive diffusion deposition*”. Dyna 82. 194 (2015): 178-184.
- [7]. Yao Sun-Hui, Su Yan-Liang and Kao Wen-xian, “*Thermal shock performance of Al_2O_3/TiO_2 air plasma spray coatings*”. Taiwan, 2011.
- [8]. Snehlatakumari Roll, “*Effect of TiO_2 addition in Al_2O_3 : Phase evolution, densification, microstructure and mechanical properties*”, No-109CR0676, 2013.
- [9]. G. Bolelli, V. Cannillo, L. Lusvardi, T. Manfredini, “*Wear behaviour of thermally sprayed ceramic oxide coatings*”. Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e dell’Ambiente, University a di Modena e Reggio Emilia, Via Vignolese 905, 41100 Modena, MO, Italy, 2006.
- [10]. A. Rico, J. Rodriguez, E. Otero, P. Zeng, W. M. Rainforth, “*Wear behaviour of nanostructured alumina–titania coatings deposited by atmospheric plasma spray*”. Wear, Vol. 267, Issues 5-8 (2009), 1191-1197.
- [11]. V. V. Narulkar, S. Prakash, K. Chandra, “*Effects of temperature on tribological properties of Al_2O_3 - TiO_2 coating*”. Defence Science Journal, Vol. 58, No. 4 (2008), 582-587.
- [12]. Roy, Ranjit K., “*Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*”. John Wiley & Sons, 2001.