

Cơ tính vật liệu lớp phủ plasma hệ gồm $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ trên bề mặt thép nền SS400

The mechanical property of plasma coating in system $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ on the substrate of steel SS400

Vũ Dương^{a,b*}, Nguyễn Thanh Tùng^{a,b}
Vu Duong^{a,b*}, Nguyen Thanh Tung^{a,b}

^aKhoa Cơ khí, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^aMechanical Engineering Faculty, Duy Tan University, 550000, Danang, Vietnam

^bViện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^bInstitute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

(Ngày nhận bài: 28/4/2022, ngày phản biện xong: 20/5/2022, ngày chấp nhận đăng: 25/5/2022)

Tóm tắt

Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu thực nghiệm xác định cơ tính thông qua tiêu chí độ cứng tế vi và độ xốp trong bộ chỉ tiêu đánh giá chất lượng của vật liệu lớp phủ plasma hệ gồm $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ trên bề mặt nền thép các bon SS400, ứng dụng cho chi tiết cơ khí làm việc trong điều kiện chịu mài mòn ở tải trọng vừa và nhỏ. Mẫu thí nghiệm nhận được bằng phương pháp phun plasma trong môi trường không khí từ bột phun tiêu chuẩn sẵn có trên thị trường Việt Nam và được khảo sát tại Phòng Thí nghiệm Kim loại học và Nhiệt luyện tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Từ khóa: Lớp phủ plasma, độ cứng tế vi, quy hoạch thực nghiệm.

Abstract

This work presented the experimental research to determine the mechanical properties through the microhardness and the porosity in the scope of qualitative assessment of plasma spray deposition from the ceramic system $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ on the substrate of the carbon steel SS400, applying for mechanical element in condition of wear abrading with medium and low load. All samples after being sprayed plasma in the atmospheric environment, using the standard available powder in domestic market of Vietnam, were tested in the Laboratory of metallography and heat treatment of Hanoi University of Science and Thechnology.

Keywords: Plasma deposition, microhardness, design of experiment

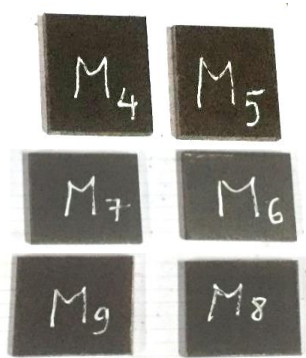
1. Đặt vấn đề

Trên thế giới, lớp phủ gốm hệ $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ với hàm lượng TiO_2 khác nhau, thường được tạo ra bằng phương pháp phun phủ nhiệt, trong đó có phun plasma trên bề mặt lớp nền thép các bon, thép không gỉ, hợp kim [1 ÷ 5], [6], sản

phẩm dùng cho y sinh [7] nhằm cải thiện và nâng cao tính năng chịu mài mòn cơ học, ăn mòn hóa học cho nhiều đối tượng sản phẩm cơ khí làm việc trong môi trường và tải trọng khác nhau hoặc môi trường y sinh. Trong một vài bài báo gần đây tác giả đã giới thiệu kết quả thực

*Corresponding Author: Vu Duong; Mechanical Engineering Faculty, Duy Tan University, 550000, Danang, Vietnam; Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam
Email: duongvuaustralia@gmail.com

nghiệm chế tạo lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - 40\%$ theo trọng lượng TiO_2 lên bề mặt lớp thép nền các bon SS400 từ bột phun thương mại trong điều kiện Việt Nam. Theo đó, đặc tính về kích thước hình học lớp phủ được khảo sát trên kính hiển vi quang học [7], cũng như đo hệ số ma sát vật liệu lớp phủ trên máy đo Tribo-Technic [8]. Tuy nhiên hai chỉ tiêu nói trên chưa đủ để có đánh giá một cách tổng hợp về chất lượng lớp phủ plasma đảm bảo đủ yêu cầu kỹ thuật để ứng dụng cho chi tiết máy làm việc trong điều kiện mài mòn cơ học dưới tải trọng vừa và nhỏ. Do đó, việc tiến hành khảo sát và xác định chỉ tiêu quan trọng là độ cứng tế vi vật liệu lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - 40\% \text{wt TiO}_2$ ở các tiểu vùng cấu trúc đặc trưng gồm: bên trong lớp phủ, vùng biên giới liên kết lớp phủ với lớp thép nền C.45 và tiểu vùng bên trong lớp thép nền lân



Hình 2.1. Mẫu thí nghiệm phun tạo lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - 40\% \text{wt TiO}_2$

cận biên giới 2 lớp là rất cần thiết để bổ sung vào bộ tiêu chí đánh giá chất lượng của nó. Thí nghiệm được nhóm nghiên cứu thực hiện trên các mẫu phun phủ bằng phương pháp plasma ở một số chế độ công nghệ phun khác nhau (Hình 2.1), sử dụng máy đo độ cứng dưới tải trọng nhỏ (Hình 2.2) hiện có tại Phòng Thí nghiệm Kim loại học và Nhiệt luyện - Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

2. Phương pháp thí nghiệm

Một số mẫu thí nghiệm sau khi phun tạo lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - 40\% \text{wt TiO}_2$ lên bề mặt lớp thép nền SS400 được cắt lấy mẫu khảo sát tổ chức tế vi và đo độ cứng tế vi tại các tiểu vùng khác nhau theo bề mặt phun phủ, sau đó được gia công bề mặt khảo sát theo mặt cắt ngang lớp phủ - lớp thép nền.



Hình 2.2. Máy đo độ cứng tế vi dưới tải trọng nhỏ

3. Kết quả thí nghiệm

3.1. Nhóm mẫu thí nghiệm thăm dò định hướng công nghệ phun plasma

Độ cứng tế vi lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ được xác định ở thang đo $\text{HV}_{0,2}$ với chế độ phun lựa chọn: $L_p = 100 \div 150 \text{mm}$ (bước

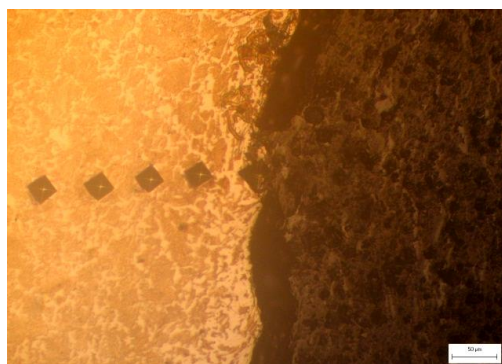
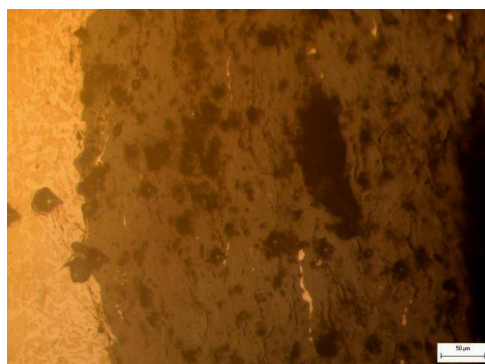
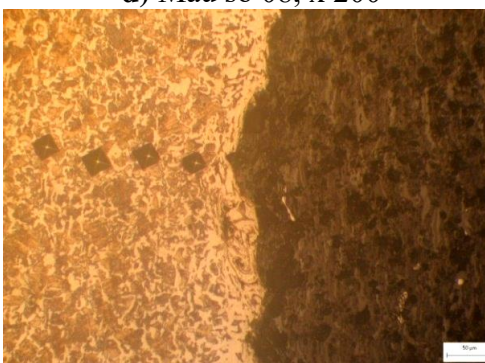
50mm); $I_p = 400 \div 600 \text{A}$ (bước 100A); $G_p = 1,7 \div 2,1 \text{kg/h}$ (bước $0,2 \text{kg/h}$) và $v_p = 50 \div 70 \text{mm/ph}$. Kết quả thí nghiệm cho trong các Bảng 3.1 và Bảng 3.2. Hình ảnh các vết đo độ cứng tế vi ($\text{HV}_{0,2}$) trên một số mẫu điển hình cho trên các Hình 3.1, a ÷ d.

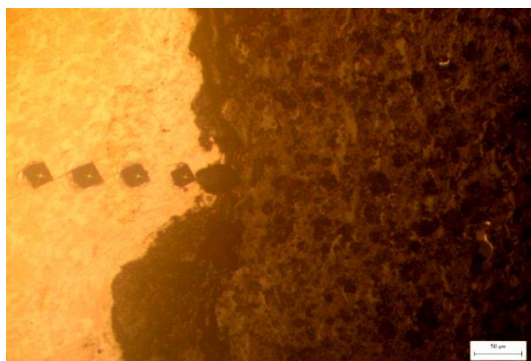
Bảng 3.1. Độ cứng tế vi vật liệu lớp thép nền SS400 gần biên giới (B.G) với phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$

Ký hiệu mẫu	Độ cứng tế vi đo tại các vị trí khác nhau từ phải qua trái, $HV_{0,2}$					
	Bên trong lớp thép nền SS400					Biên giới 2 lớp
	Trung bình	4 (200 μ m)	3 (150 μ m)	2 (100 μ m)	1 (50 μ m)	0 (góc tọa độ)
04	195,2	188	182	190	221	316
05	199,7	184	179	221	263	237
06	211,7	180	175	208	236	120
07	196,0	197	158	179	250	294
08	172	157	155	176	200	144
09	166,5	155	163	180	168	145

Bảng 3.2. Độ cứng tế vi vật liệu lớp thép nền SS400 gần biên giới với phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$

Ký hiệu mẫu	Độ cứng tế vi đo tại các vị trí khác nhau từ trái qua phải, $HV_{0,2}$									
	Biên giới 2 lớp 0 (góc tọa độ)	Bên trong lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$								
		1 (50 μ m)	2 (100 μ m)	3 (150 μ m)	4 (200 μ m)	5 (250 μ m)	6 (300 μ m)	7 (350 μ m)	8(400 μ m)/ 9(450 μ m)	Trung bình
04	316	389	485	303	417	380	-	-	-	394,8
05	237	389	522	265	559	597	-	-	-	466,4
06	120	272	452	581	587	434	583	556	732/237	492,6
07	294	299	404	582	512	459	639	680	600	521,875
08	144	555	647	508	591	456	541	615	-	552,8
09	145	515	440	586	470	492	622	611	708/661	567,2

← Lớp thép B.G. Lớp phủ →
c) Mẫu số 06, x 200←Lớp thép B.G. Lớp phủ →
d) Mẫu số 08, x 200←Lớp thép B.G. Lớp phủ →
e) Mẫu số 11, x 200← Lớp thép B.G. Lớp phủ →
f) Mẫu số 13, x 200



← L.thép B.G. Lớp phủ →
g) Mẫu số 18 x 200



← L.thép B.G. Lớp phủ →
h) Mẫu số 19, x 200

Hình 3.1 Ảnh chụp tổ chức tế vi có vết đo độ cứng tế vi ($HV_{0,2}$)

Phân tích kết quả thí nghiệm trong Bảng 3.1, Bảng 3.2 và Hình 3.1 đối với nhóm mẫu thăm dò định hướng công nghệ phun tạo lớp phủ plasma cho thấy:

- Mẫu số 04: độ cứng tế vi lớp thép SS400 có giá trị trung bình là $195,2HV_{0,2}$. Độ cứng tế vi đo trên đường biên giới liên kết 2 lớp thép SS400 – lớp phủ plasma là $316HV_{0,2}$, còn bên trong lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là $394,8HV_{0,2}$, lớn hơn đáng kể so với độ cứng tế vi bên trong lớp thép SS400.

- Mẫu số 05: độ cứng tế vi trung bình của lớp thép nền SS400 là $199,7HV_{0,2}$, còn trên biên giới liên kết 2 lớp có giá trị bằng $237HV_{0,2}$ và bên trong lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là $466,4HV_{0,2}$, lớn hơn nhiều so với độ cứng tế vi bên trong lớp thép SS400.

- Mẫu số 06: độ cứng tế vi trung bình lớp thép SS400 là $211,75HV_{0,2}$, trên biên giới 2 lớp thép SS400 – lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ có giá trị bằng $120HV_{0,2}$ và lớp phủ plasma là $492,6HV_{0,2}$, lớn hơn 2,32 lần so với độ cứng tế vi trong lớp thép SS400.

- Mẫu số 07: độ cứng tế vi trung bình của lớp thép nền SS400 có giá trị là $196HV_{0,2}$, trên biên giới 2 lớp là $294HV_{0,2}$ và lớp phủ plasma

$Al_2O_3 - TiO_2$ là $521,875HV_{0,2}$, lớn hơn 2,66 lần so với độ cứng tế vi bên trong lớp thép SS400.

- Mẫu số 08: độ cứng tế vi trung bình của lớp thép nền C45 có giá trị bằng $172HV_{0,2}$, trên biên giới 2 lớp là $144HV_{0,2}$ và lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là $552,8HV_{0,2}$, lớn hơn khoảng 3,2 lần so với độ cứng tế vi bên trong lớp thép SS400.

- Mẫu số 09: lớp thép nền SS400 có độ cứng tế vi trung bình là tại 04 điểm đo cách đều $50 \mu m$ (tính từ biên giới 2 lớp đi vào lớp thép) dao động trong $166,5HV_{0,2}$, trên biên giới 2 lớp là $145HV_{0,2}$ và lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là $567,2HV_{0,2}$.

3.2. Nhóm mẫu thí nghiệm sau điều chỉnh công nghệ phun plasma

Độ cứng tế vi lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ được xác định ở thang đo $HV_{0,2}$ sau điều chỉnh công nghệ với: $L_p = 100 \div 200mm$ (bước $50mm$); $I_p = 400 \div 600A$ (bước $100mm$); $G_p = 1,7 \div 1,9kg/h$ (bước $0,1kg/h$) và $v_p = 50 \div 60mm/ph$. Kết quả thí nghiệm cho trong các Bảng 3.3 và Bảng 3.4. Hình ảnh các vết đo độ cứng tế vi ($HV_{0,2}$) trên một số mẫu điển hình cho trên Hình 3.1, e ÷ h.

Bảng 3.3 Độ cứng tế vi lớp thép SS400 và trên biên giới SS400 - Al₂O₃ - TiO₂

Độ cứng tế vi đo tại các phân vùng cấu trúc đặc trưng của lớp phủ, HV _{0,2}				
Ký hiệu mẫu	Khoảng cách tính từ biên giới lớp thép SS400 – lớp phủ Al ₂ O ₃ –TiO ₂ theo hướng đi vào lớp thép SS400, μm			Biên giới thép SS400- lớp phủ Al ₂ O ₃ –TiO ₂ (B.G. 2 lớp)
	150	100	50	
11	170	150	126	215
13	176	159	175	192
18	178	177	219	218
19	202	168	154	277
24	-	221	202	159
Trung bình	181,5	175,0	175,2	212,2

Bảng 3.4. Độ cứng tế vi trên biên giới với lớp thép SS400 và lớp phủ plasma Al₂O₃ - TiO₂

Độ cứng tế vi đo tại các phân vùng cấu trúc đặc trưng của lớp phủ, HV _{0,2}								
Ký hiệu mẫu	Khoảng cách tính từ biên giới thép C45 - hợp kim Al ₂ O ₃ – TiO ₂ theo hướng đi vào lớp phủ, μm							Biên giới thép C45 - hợp kim Al ₂ O ₃ –TiO ₂ (B.G. 2 lớp)
	50	100	150	200	250	300	350	
11	251	438	451	425	-	-	-	215
13	129	513	414	296	456	456	-	192
18	416	437	310	314	358	396	350	218
19	322	197	277	300	-	-	-	277
24	332	402	449	473	690	413	-	159
Trung bình	290,0	397,4	380,2	361,6	501,3	421,6	350,0	212,2

Phân tích các số liệu thực nghiệm trên 05 mẫu nhận được trong số các mẫu QHTN 3 cho trong Bảng 3.3, Bảng 3.4 và Hình 3.1, a có nhận xét như sau:

- Mẫu số 11: độ cứng tế vi trung bình của lớp thép SS400 có giá trị trung bình là 148,66 HV_{0,2} với xu hướng càng đi xa vào bên trong lớp thép tính từ biên giới 2 lớp thì độ cứng càng tăng. Biên giới liên kết 2 lớp thép với lớp phủ plasma có độ cứng tế vi là 215HV_{0,2}, còn bên trong lớp phủ plasma Al₂O₃ - TiO₂ là 391,25HV_{0,2}, tức là cao hơn khoảng 2,63 lần so với độ cứng tế vi bên trong lớp thép SS400.

- Mẫu số 13: độ cứng tế vi trung bình của lớp thép nền là 170HV_{0,2}, trên biên giới liên kết 2 lớp với lớp phủ plasma là 192HV_{0,2} và bên trong lớp phủ plasma Al₂O₃ - TiO₂ là 361,6HV_{0,2}, tức là cao hơn khoảng 2,12 lần so với độ cứng tế vi của lớp thép SS400.

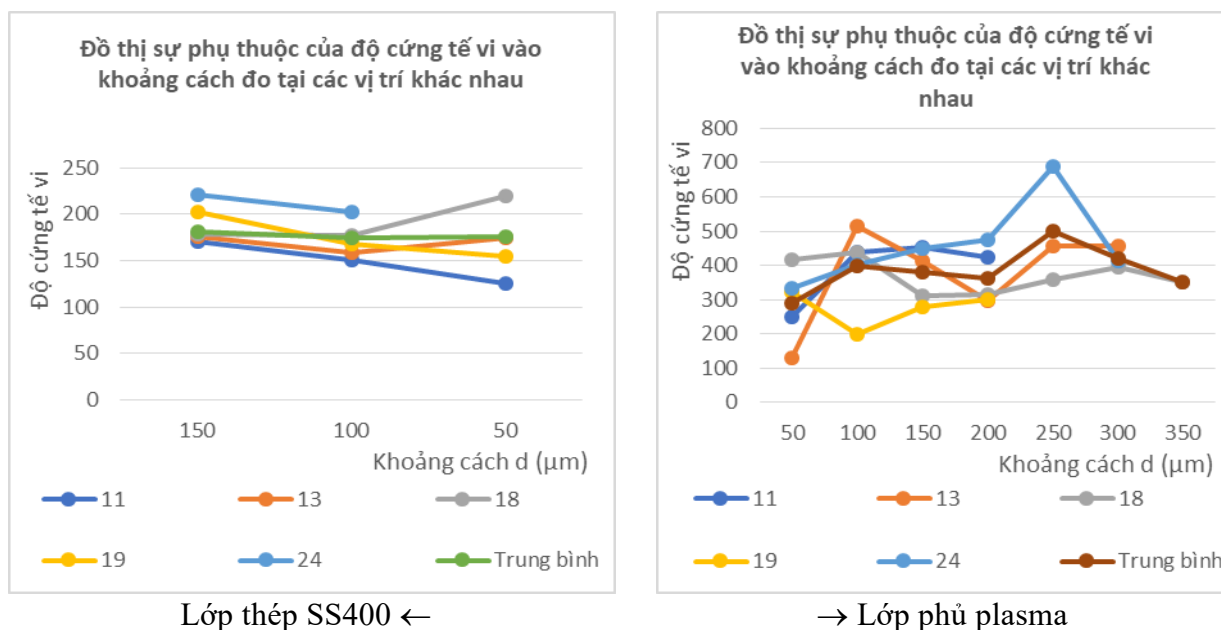
- Mẫu số 18: độ cứng tế vi trung bình của lớp thép nền có giá trị là 191,3HV_{0,2}, trên biên giới liên kết 2 lớp thép và lớp phủ plasma là 218HV_{0,2} và lớp phủ plasma Al₂O₃ - TiO₂ là 368,7HV_{0,2}, tức là cao hơn khoảng 1,92 lần so với độ cứng tế vi trong lớp thép SS400.

- Mẫu số 19: độ cứng tế vi trung bình của lớp thép nền có giá trị bằng 174,67HV_{0,2}, trên biên giới liên kết 2 lớp thép và lớp phủ plasma là 227HV_{0,2} và lớp phủ plasma Al₂O₃ - TiO₂ là 274HV_{0,2}, tức là cao hơn khoảng 1,56 lần so với độ cứng tế vi trong lớp thép SS400.

- Mẫu số 24: độ cứng tế vi trung bình của vật liệu lớp thép nền có giá là 211,5HV_{0,2}, trên biên giới liên kết 2 lớp thép và lớp phủ plasma là 159HV_{0,2} và lớp phủ plasma Al₂O₃ - TiO₂ là 459,8HV_{0,2}, tức là cao hơn khoảng 2,17 lần so với độ cứng tế vi trong lớp thép SS400.

Trên Hình 3.2 là đồ thị biểu diễn sự thay đổi độ cứng tế vi xác định tại các tiểu vùng cấu trúc đặc trưng được khảo sát theo mặt cắt ngang lớp

phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ liên kết với lớp thép nền SS400 ở trạng thái sau khi phun phủ.



Hình 3.2. Đồ thị sự phụ thuộc của độ cứng tế vi vào khoảng cách đo tại các vị trí khác nhau tính từ biên giới 2 lớp thép SS400 – lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$

Như vậy, tổng hợp kết quả đo độ cứng tế vi trên tất các mẫu thí nghiệm nói trên với các giá trị đo được tại các vị trí cách biên giới liên kết 2 lớp thép SS400 và lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ theo hướng đi từ điểm biên giới (vị trí 0) về phía lớp thép, thì độ cứng tế vi có xu hướng tăng tỷ lệ thuận với chiều tăng của khoảng cách đo, nhưng có giá trị thấp hơn so với giá trị đo được trên biên giới 2 lớp. Khi xét theo chiều đi từ biên giới 2 lớp ra phía lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ ở các khoảng cách khác nhau, độ cứng tế vi của vật liệu lớp phủ có giá trị trung bình thường cao hơn khá nhiều so với độ cứng đo được trên biên giới liên kết 2 lớp. Điều đó cho thấy lớp phủ plasma nhận được sau khi phun lên bề mặt lớp thép các bon SS400 sẽ có khả năng chịu mài mòn cơ học cao hơn so với khi chưa có lớp phủ.

3.3. Nhóm mẫu thí nghiệm đo độ xốp lớp phun plasma

Kết quả thực nghiệm khảo sát trên 09 mẫu quy hoạch thực nghiệm trực giao kiểu L9 cho trong Bảng 5. Chế độ phun tạo lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ trên bề mặt thép nền SS400 lựa chọn ở đây được tiến hành để nghiên cứu khảo sát sự ảnh hưởng đồng thời của cả 3 thông số công nghệ đầu vào gồm khoảng cách phun (L_p); cường độ dòng plasma (I_p) và lưu lượng cấp bột phun (G_p) đến hàm mục tiêu đầu ra là độ xốp xác định bằng phương pháp kim tương học (γ_p) khi chọn tham số tốc độ phun ở mức cố định ($v_p = 60$ mm/s).

Bảng 3.5. Độ xốp kim tương học của vật liệu lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$

Số TT	Mã Số	L, mm	I, A	G, kg/h	Độ xốp trung bình lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$, %		
					Thực nghiệm	Tính toán mô phỏng	Độ lệch tương đối
1	000	100	400	1,7	14,520	14,675	1,07%

2	010	100	500	1,7	13,538	12,88	-4,86%
3	020	100	600	1,7	11,355	11,125	-2,02%
4	100	150	400	1,7	10,985	11,159	1,59%
5	110	150	500	1,7	9,695	10,111	4,29%
6	120	150	600	1,7	7,765	8,8491	13,96%
7	200	200	400	1,7	8,125	8,2424	1,44%
8	210	200	500	1,7	7,773	7,6868	-1,11%
9	220	200	600	1,7	7,321	6,9176	-5,51%

Phân tích số liệu thực nghiệm trong Bảng 3.5 cho thấy:

- Mẫu số 1 (mã số 000) nhận được khi phun với 3 thông số công nghệ chính đầu vào chọn ở mức thấp nhất trong miền quy hoạch thực nghiệm: $L_p = 100\text{mm}$; $I_p = 400\text{A}$ và $G_p = 1,7\text{kg/h}$, có độ xốp lớp phủ plasma đạt giá trị $\gamma_{p1} = 14,52\%$. Áp dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất để xử lý các số liệu thống kê toán học thực nghiệm đối với mảng quy hoạch trực giao kiểu L9 nhận được độ xốp trung bình tính toán mô phỏng có giá trị là 14,675%. Sai số giữa các giá trị thực nghiệm với tính toán mô phỏng là rất nhỏ (+1,07%). Đánh giá sơ bộ toàn bộ bề mặt lớp phủ gồm cho thấy có sự liên kết đồng đều trên suốt chiều dài mẫu khảo sát. Tổ chức tế vi và ảnh đồ phân tích cấu trúc vật liệu lớp phủ cho trên Hình 3.2, a,b.

- Chế độ phun đối với mẫu số 2 (mã số 010) được chọn với điều chỉnh thông số cường độ dòng plasma lên mức trung bình trong miền quy hoạch thực nghiệm: $L_p = 100\text{mm}$; $I_p = 500\text{A}$ và $G_p = 1,7\text{kg/h}$. Ở chế độ thí nghiệm này đảm bảo tạo ra được lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ có liên kết với lớp thép nền SS400 tương đối tốt. Độ xốp trung bình của lớp phủ có giá trị là $\gamma_{p2} = 13,538\%$, giảm 6,76% so với mẫu số 1 trên đây. Độ xốp tính toán theo mô hình hàm hồi quy có giá trị là 12,88%. Sai số giữa các giá trị thực nghiệm với tính toán mô phỏng là rất nhỏ (- 4,87%). Liên kết giữa lớp phủ gồm với lớp thép nền khá đồng đều trên toàn bộ chiều dài

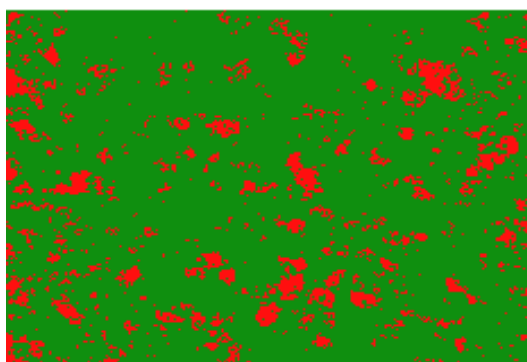
mẫu khảo sát. Tổ chức tế vi và ảnh đồ phân tích cấu trúc vật liệu lớp phủ cho trên Hình 3.2, c,d.

- Độ xốp của mẫu thí nghiệm số 3 (mã số 020), nhận được ở chế độ phun có điều chỉnh dòng plasma lên cao nhất trong miền quy hoạch thực nghiệm ($I_p = 600\text{A}$), còn hai thông số $L_p = 100\text{mm}$ và $G_p = 1,7\text{kg/h}$ vẫn chọn ở mức thấp. Độ xốp trung bình của vật liệu lớp phủ có giá trị là $\gamma_{p3} = 11,355\%$, giảm 14,99% là rất đáng kể so với mẫu số 2 đã xét ở trên. Độ xốp tính toán theo mô hình hàm hồi quy có giá trị là 11,125%. Sai số giữa các giá trị thực nghiệm với tính toán mô phỏng là khá nhỏ (- 2,02%). Lớp phủ gồm có liên kết tốt trên toàn bộ chiều dài mẫu khảo sát. Tổ chức tế vi và ảnh đồ phân tích cấu trúc vật liệu lớp phủ cho trên Hình 3.2, e,f.

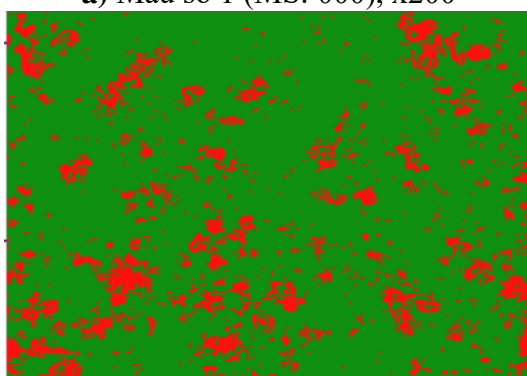
- Mẫu thí nghiệm số 4 (mã số 100) nhận được ở chế độ phun trong miền quy hoạch thực nghiệm với: $L_p = 150\text{mm}$; $I_p = 400\text{A}$ và $G_p = 1,7\text{kg/h}$. Ở đây điều chỉnh khoảng cách phun lên mức trung bình, còn I_p và G_p vẫn chọn ở mức thấp trong miền quy hoạch thực nghiệm. Độ xốp của vật liệu lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ ở thí nghiệm này có giá trị trung bình là $\gamma_{p4} = 10,985\%$, giảm 3,258% so với hai mẫu số 3 kể trên. Độ xốp tính toán theo mô hình hàm hồi quy có giá trị là 11,159%. Sai số giữa các giá trị thực nghiệm với tính toán mô phỏng là khá nhỏ (+1,59%). Theo chiều dài mẫu khảo sát lớp phủ gồm có liên kết tốt với lớp thép nền. Tổ chức tế vi và ảnh đồ phân tích cấu trúc vật liệu lớp phủ cho trên Hình 3.2, g,h.

- Chế độ phun đối với mẫu số 5 (mã số 110) được chọn với điều chỉnh thông số khoảng cách phun và cường độ dòng plasma lên mức trung bình trong miền quy hoạch thực nghiệm: $L_p = 150\text{mm}$; $I_p = 500\text{A}$, còn lưu lượng cấp bộ giữ ở mức thấp trong miền quy hoạch thực nghiệm $G_p = 1,7\text{kg/h}$. Lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ có độ xốp trung bình là $\gamma_{p5} = 9,695\%$, giảm

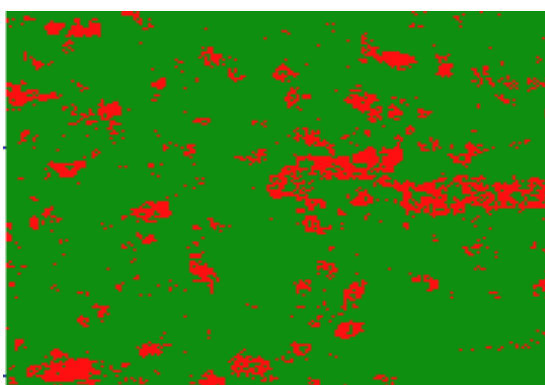
11,74% so với mẫu số 4 trên đây. Độ xốp tính toán mô phỏng có giá trị là 10,11%. Sai số giữa các giá trị thực nghiệm với tính toán mô phỏng là rất nhỏ (+ 4,29%). Liên kết giữa hai lớp phủ gốm và thép nền khá tốt trên toàn bộ chiều dài mẫu khảo sát. Tổ chức tế vi và ảnh đồ phân tích cấu trúc vật liệu lớp phủ cho trên Hình 3.2, k,l.



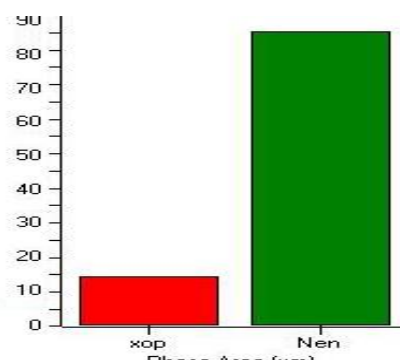
a) Mẫu số 1 (MS: 000), x200



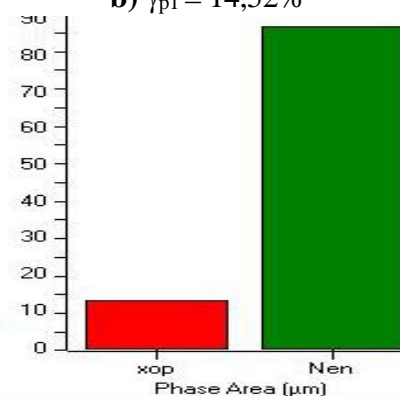
c) Mẫu số 2 (MS: 010), x200



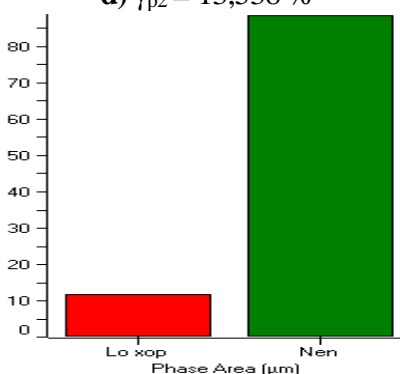
e) Mẫu số 3 (MS: 020), x200



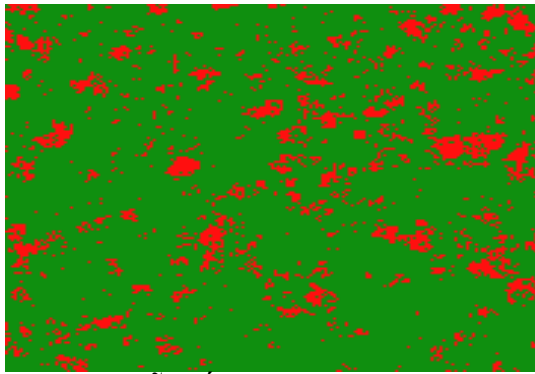
b) $\gamma_{p1} = 14,52\%$



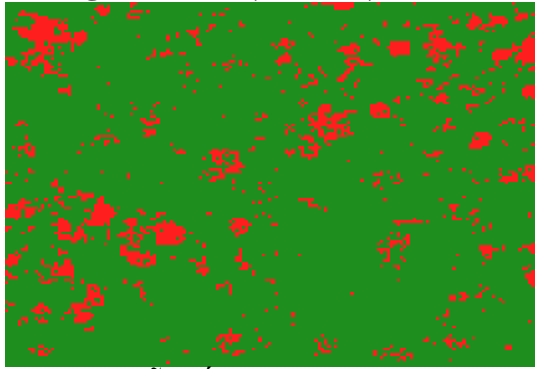
d) $\gamma_{p2} = 13,538\%$



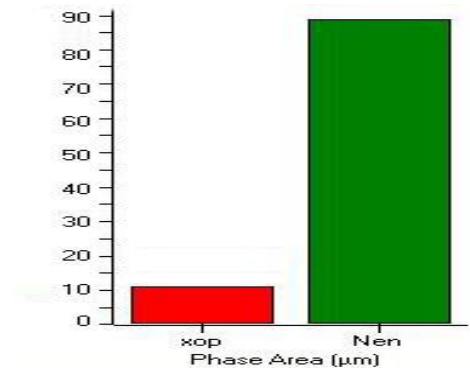
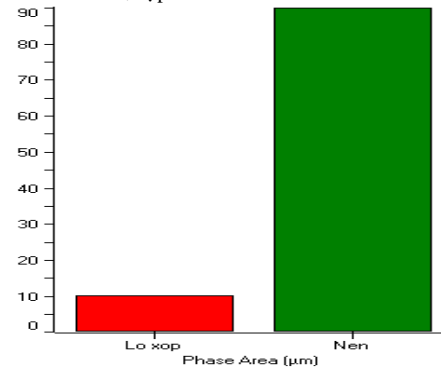
f) $\gamma_{p3} = 11,355\%$



g) Mẫu số 4 (MS: 020), x200



k) Mẫu số 5 (MS: 020), x200

h) $\gamma_{p4} = 10,985 \%$ l) $\gamma_{p5} = 9,695 \%$

Hình 3.2. Ảnh tổ chức tế vi (a) và biểu đồ độ xốp lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ (b) phụ thuộc vào chế độ phun L_p ; I_p và G_p

- Mẫu thí nghiệm số 6 (mã số 120) nhận được ở chế độ phun trong miền quy hoạch thực nghiệm với: $L_p = 150\text{mm}$; $I_p = 600\text{A}$ và $G_p = 1,7\text{kg/h}$. Ở đây điều chỉnh khoảng cách phun lên mức trung bình, còn I_p và G_p vẫn chọn ở mức thấp trong miền quy hoạch thực nghiệm. Độ xốp của vật liệu lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ ở thí nghiệm này có giá trị trung bình là $\gamma_{p6} = 7,765\%$, giảm mạnh đến 19,36% so với hai mẫu số 5 ở trên. Độ xốp tính toán theo mô hình hàm hồi quy có giá trị là 8,8491%. Sai số giữa các giá trị thực nghiệm với tính toán mô phỏng là khá lớn (+13,96%). Theo chiều dài mẫu khảo sát lớp phủ gồm có liên kết tốt với lớp thép nền. Tổ chức tế vi và ảnh đồ phân tích cấu trúc vật liệu lớp phủ cho trên Hình 3.3, a,b.

- Độ xốp của mẫu thí nghiệm số 7 (mã số 200), nhận được ở chế độ phun có điều chỉnh dòng plasma lên cao nhất trong miền quy hoạch thực nghiệm ($I_p = 400\text{A}$), còn hai thông số $L_p = 200\text{mm}$ và $G_p = 1,7\text{kg/h}$ chọn ở mức thấp.

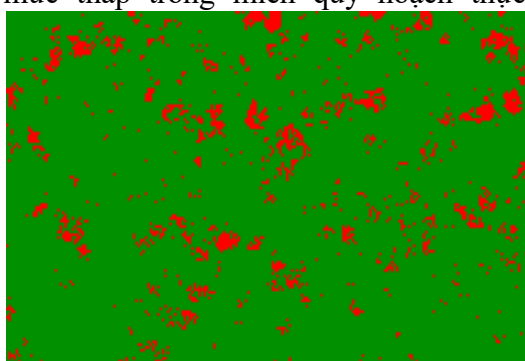
Độ xốp trung bình của vật liệu lớp phủ có giá trị là $\gamma_{p7} = 8,125\%$, giảm 14,99% là rất đáng kể so với mẫu số 2 đã xét ở trên. Độ xốp tính toán theo mô hình hàm hồi quy có giá trị là 7,6868%. Sai số giữa các giá trị thực nghiệm với tính toán mô phỏng khá nhỏ (- 1,11%). Lớp phủ gồm có liên kết tốt trên toàn bộ chiều dài mẫu khảo sát. Tổ chức tế vi và ảnh đồ phân tích cấu trúc vật liệu lớp phủ cho trên Hình 3.3,c,d.

- Mẫu thí nghiệm số 8 (mã số 210) nhận được ở chế độ phun trong miền quy hoạch thực nghiệm với: $L_p = 200\text{mm}$; $I_p = 500\text{A}$ và $G_p = 1,7\text{kg/h}$. Ở đây điều chỉnh khoảng cách phun lên mức trung bình, còn I_p và G_p vẫn chọn ở mức thấp trong miền quy hoạch thực nghiệm. Độ xốp của vật liệu lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ ở thí nghiệm này có giá trị trung bình là $\gamma_{p8} = 7,773\%$, giảm 3,258% so với hai mẫu số 3 kể trên. Độ xốp tính toán theo mô hình hàm hồi quy có giá trị là 11,159%. Sai số giữa các giá trị thực nghiệm với tính toán mô phỏng là khá nhỏ

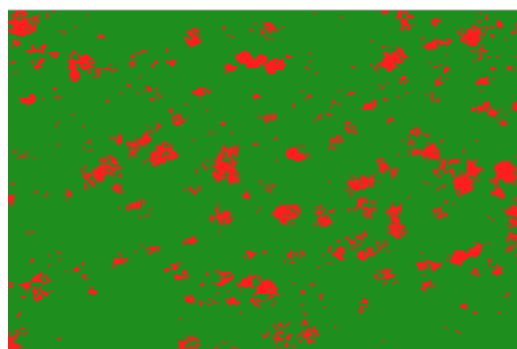
(+1,59%). Theo chiều dài mẫu khảo sát lớp phủ gồm có liên kết tốt với lớp thép nền. Tổ chức tế vi và ảnh đồ phân tích cấu trúc vật liệu lớp phủ cho trên Hình 3.3, e,f.

- Chế độ phun đối với mẫu số 9 (mã số 220) được chọn với điều chỉnh thông số khoảng cách phun và cường độ dòng plasma lên mức cao nhất trong miền quy hoạch thực nghiệm: $L_p = 200\text{mm}$; $I_p = 600\text{A}$, còn lưu lượng cấp bộ giữ ở mức thấp trong miền quy hoạch thực

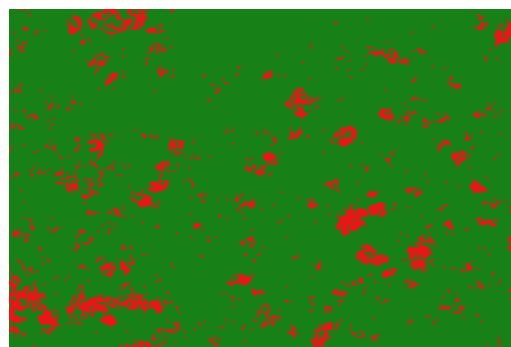
nghiệm $G_p = 1,7\text{kg/h}$. Lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ có độ xốp trung bình là $\gamma_{p9} = 7,321\%$, giảm 5,81% so với mẫu số 8 trên đây. Độ xốp tính toán mô phỏng có giá trị là 6,917%. Sai số giữa các giá trị thực nghiệm với tính toán mô phỏng là - 5,51%. Liên kết giữa hai lớp phủ gốm và thép nền khá tốt trên toàn bộ chiều dài mẫu khảo sát. Tổ chức tế vi và ảnh đồ phân tích cấu trúc vật liệu lớp phủ cho trên Hình 3.3, g,h.



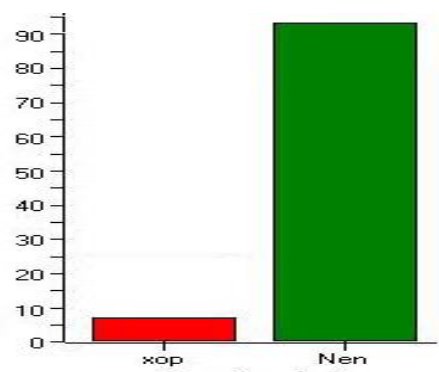
a) Mẫu số 6 (MS: 120), x200



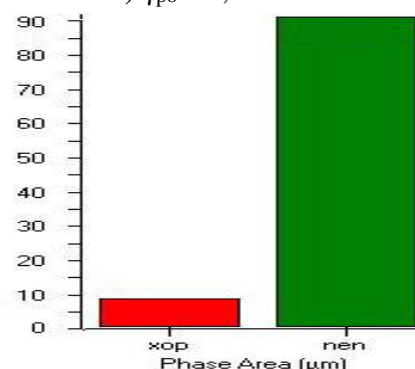
c) Mẫu số 7 (MS: 200), x200



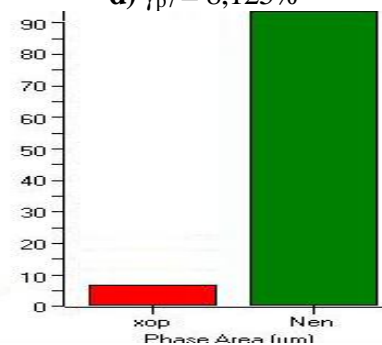
e) Mẫu số 8 (MS: 210), x200



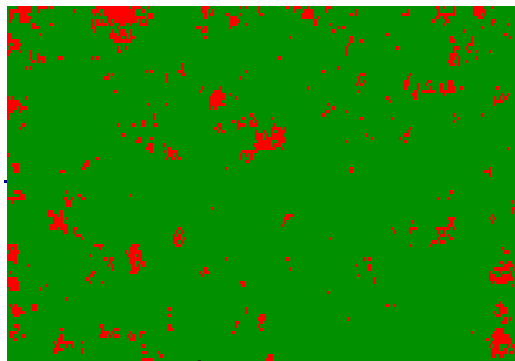
b) $\gamma_{p6} = 7,765\%$



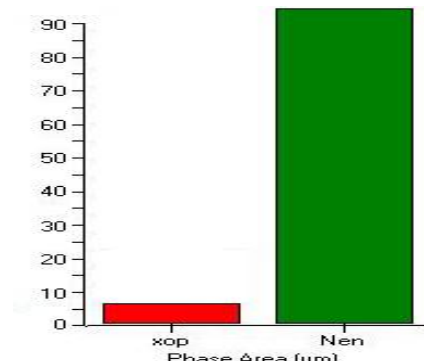
d) $\gamma_{p7} = 8,125\%$



f) $\gamma_{p8} = 7,773\%$



g) Mẫu số 9 (MS: 220), x200

h) $\gamma_{p9} = 7,321\%$

Hình 3.3. Ảnh tổ chức tế vi (a) và biểu đồ độ xốp lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ phụ thuộc vào chế độ phun L_p ; I_p và G_p

Nhận xét: trong tất cả 9 mẫu thí nghiệm đã xét trên đây, tác động của khoảng cách phun (L_p) đảm bảo cho động năng va đập của các hạt phun $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$, cường độ dòng plasma (I_p) và lưu lượng cấp bột (G_p) đều đảm bảo yêu cầu phun cần thiết để tạo ra được lớp phủ có sự liên kết tương đối tốt với lớp thép nền SS400. Độ xốp trung bình của vật liệu lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ có xu hướng giảm tỷ lệ nghịch theo chiều tăng của 3 thông số L_p ; I_p (khi xét điều kiện biên là G_p và v_p chọn ở một mức cố định không đổi).

4. Kết luận

Kết quả thực nghiệm cho thấy độ cứng tế vi vật liệu lớp thép nền SS400, vùng cấu trúc biên giới liên kết của nó với lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ và bên trong lớp phủ có quy luật sau:

- Lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ có độ cứng tế vi trên tất cả các mẫu khảo sát đều có giá trị thường cao hơn so với trên biên giới 2 lớp và bên trong lớp thép nền SS400.

- Vùng cấu trúc biên giới liên kết lớp thép nền SS400 và lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ có giá trị trung gian, thấp hơn so với lớp phủ và cao hơn so với lớp thép nền;

- Lớp thép nền SS400 có độ cứng tế vi thấp hơn các vùng cấu trúc vật liệu trên biên giới liên kết 2 lớp và lớp phủ plasma.

- Lớp phủ plasma $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ sau khi phun trực tiếp lên bề mặt mẫu thép tấm SS400

theo các chế độ quy hoạch thực nghiệm trực giao L9 có độ xốp vẫn còn khá cao, chưa đạt yêu cầu như mong muốn. Vì vậy, trong các nghiên cứu theo quy hoạch thực nghiệm tiếp theo kiểu L27 đủ hơn, cần có điều chỉnh miền giá trị của các thông số công nghệ đầu vào nhằm mục tiêu giảm thiểu độ xốp của lớp phủ plasma đến mức nhỏ nhất để nâng cao tính năng làm việc của nó. Tuy nhiên, cần nhấn mạnh rằng: về nguyên lý công nghệ nói chung thì không thể nhận được lớp phủ mà không có lỗ xốp bên trong nó bằng bất kỳ phương pháp phun phủ nhiệt cơ bản đã biết nào.

Kết quả thực nghiệm trên đã chứng minh được vật liệu lớp phủ plasma đảm bảo tốt cho việc nâng cao khả năng chịu mài mòn cơ học của bề mặt chi tiết sau khi được phun phủ.

Tài liệu tham khảo

- [1] 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 ngành “Công nghệ tạo hình vật liệu”, Viện Nghiên cứu Cơ khí, Hà Nội.
- [2] 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.
- [3] Nguyễn Thanh Phú (2020), “Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ phun phủ HVOF đến chất lượng lớp phủ bề mặt chi tiết làm việc trong điều kiện khắc nghiệt bị mòn”, Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật Cơ khí, Viện Nghiên cứu Cơ khí, Hà Nội.

- [4]. Đặng Xuân Thao (2021), “Nghiên cứu công nghệ phun phủ bằng hợp kim nền crôm, ứng dụng để phục hồi quạt công nghiệp làm việc trong điều kiện chịu mài mòn và nhiệt độ cao”, Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội.
- [5] “*Delayed Failure of Plasma –Sprayed Al_2O_3 Applied to Metallic Substrates*”, The American Ceramic Society, Oak Ridge National Laboratory (Oak Ridge, Tennessee 37830) and Department of Ceramic Engineering, Illinois (University of Illinois at Urbana- Champaign, Urbana, Illinois 61801).
- [6] Yu Bai, Sheng-Jian Zhou, Li Shi, Wen Ma, Cai-wen Liu (2018), *Fabrication and Characterization of Suspension Plasma-Sprayed Fluoridated Hydroxyapatite Coating for Biomedical Applications*, CrossMark: J. Therm Spray Tech (2018) 27:1322-1332, <https://doi.org/10.1007/s11666-018-0747-6>.
- [7] Bùi Văn Khoản, Hà Minh Hùng, Lê Thu Quý, Hoàng Thị Ngọc Quyên (2021), “Nghiên cứu đặc tính ma sát học vật liệu lớp phủ plasma hệ gốm $Al_2O_3 - TiO_2$ ứng dụng cho chi tiết máy chịu mài mòn cơ học”, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 06/T6-2021.
- [8] Hà Minh Hùng, Vũ Dương, Nguyễn Văn Đức (2021), *Nghiên cứu xác định chiều dày lớp phủ plasma vật liệu gốm $Al_2O_3 - TiO_2$ bằng phương pháp kim tương học*, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 1+2, 2022.