

XÁC ĐỊNH ĐỘ CỨNG TẾ VI VẬT LIỆU LỚP PHỦ PLASMA HỆ GỒM $Al_2O_3 - TiO_2$ TRÊN BỀ MẶT THÉP NỀN SS400

TO EVALUATE THE MICROHARDNESS OF PLASMA COATING IN SYSTEM
 $Al_2O_3 - TiO_2$ ON THE SUBSTRATE OF STEEL SS400

TS. Vũ Dương¹, PGS, TS. Hà Minh Hùng^{2,3}, ThS. Nguyễn Văn Đức⁴,
ThS. Bùi Văn Khoản⁵

¹Trường Đại học Duy Tân

²Viện Nghiên cứu Cơ khí

³Viện Phát triển Kỹ thuật, Công nghệ tiên tiến

⁴Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

⁵Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu thực nghiệm xác định đặc tính cơ học thông qua tiêu chí độ cứng tế vi trong bộ chỉ tiêu đánh giá chất lượng của vật liệu lớp phủ plasma hệ gồm $Al_2O_3 - TiO_2$ 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 in the scope of qualitative assessment of plasma spray deposition from the ceramic system $Al_2O_3 - TiO_2$ 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 plasma spray in the atmospheric environment, using the standard available powder in domestic market of Vietnam, had tested in the Laboratory of metallography and heat treatment of Hanoi University of Science and Technology.

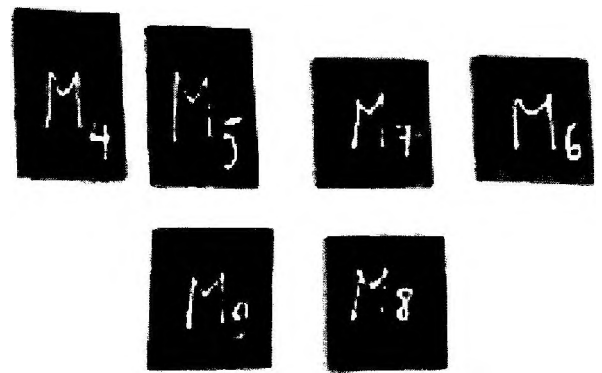
Keywords: *Plasma deposition; Microhardness; Design experiment.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trên thế giới, lớp phủ gồm hệ $Al_2O_3 - TiO_2$ 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 chống 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 nghiệm chế tạo lớp phủ plasma $Al_2O_3 - 40\%wt TiO_2$ 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 $Al_2O_3 - 40\%wt TiO_2$ 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 cận biên giới hai 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 1), sử dụng máy đo độ cứng dưới tải trọng nhỏ (hình 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 $Al_2O_3 - 40\%wt TiO_2$ lên bề mặt lớp thép nền SS400 được cất 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 1. Mẫu thí nghiệm phun tạo lớp phủ plasma $Al_2O_3 - 40\%wt.TiO_2$



Hình 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 $Al_2O_3 - TiO_2$ được xác định ở thang đo $HV_{0,2}$ với chế độ phun lựa chọn: $L_p = 100 \div 150$ mm (bước 50 mm); $I_p = 400 \div 600$ A (bước 100 A); $G_p = 1,7 \div 2,1$ kg/h (bước 0,2 kg/h) và $v_p = 50 \div$

70 mm/ph. Kết quả thí nghiệm cho trong các bảng 1 và 2. Hình ảnh các vết đo độ cứng tế vi ($HV_{0,2}$) trên một số mẫu điển hình cho trên hình 3, a ÷ d.

Bảng 1. Độ cứng tế vi vật liệu lớp thép nền SS400 gần biên giới với phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$

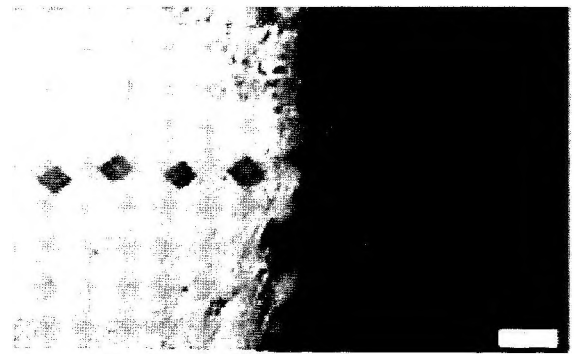
Ký hiệu mẫu	Độ cứng tế vi đo tại các vị trí khác nhau từ phải qua trái, $HV_{0,2}$					
	Bên trong lớp thép nền SS400					Biên giới 2 lớp
	Trung bình	4 (200 μm)	3 (150 μm)	2 (100 μm)	1 (50 μm)	0 (góc tọa độ)
04	195,2	188	182	190	221	316
05	199,7	184	179	221	263	237
06	211,7	180	175	208	236	120
07	196,0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

Bảng 2. Độ cứng tế vi vật liệu lớp thép nền SS400 gần biên giới với phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$

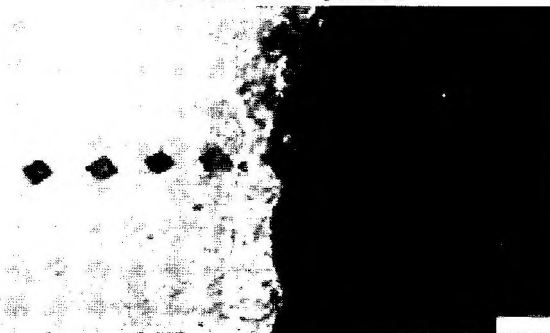
Ký hiệu mẫu	Độ cứng tế vi đo tại các vị trí khác nhau từ trái qua phải, $HV_{0,2}$									
	Biên giới 2 lớp	Bên trong lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$								
		0 (góc tọa độ)	1 (50 μm)	2 (100 μm)	3 (150 μm)	4 (200 μm)	5 (250 μm)	6 (300 μm)	7 (350 μm)	8 (400 μm)/ 9 (450 μm)
04	316	389	485	303	417	380	-	-	-	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



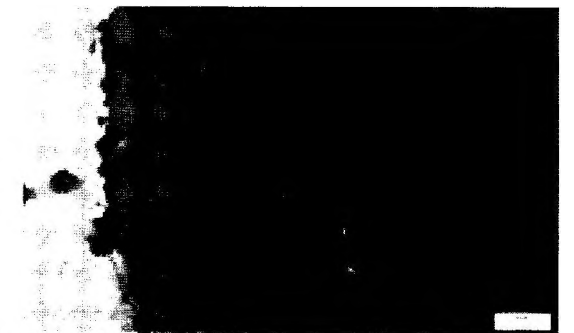
← Lớp thép B.G. Lớp phủ →
a) Mẫu số 04, x 200



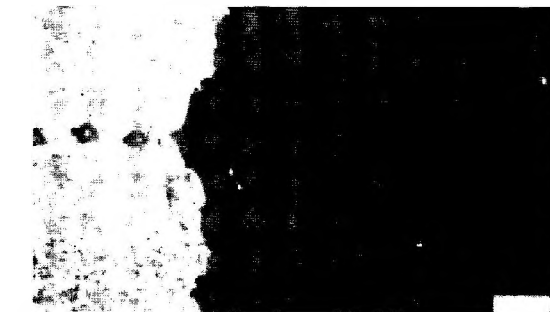
← Lớp thép B.G. Lớp phủ →
b) Mẫu số 05, x 200



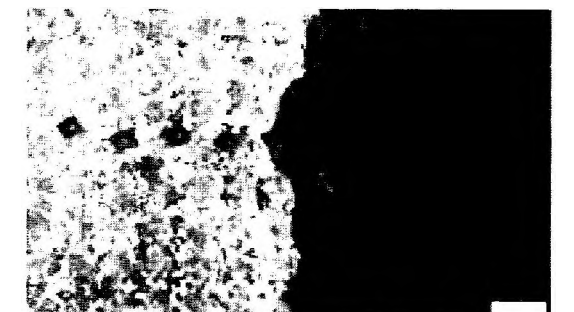
← Lớp thép B.G. Lớp phủ →
c) Mẫu số 06, x 200



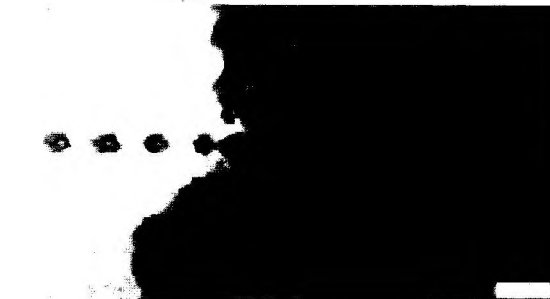
← Lớp thép B.G. Lớp phủ →
d) Mẫu số 08, x 200



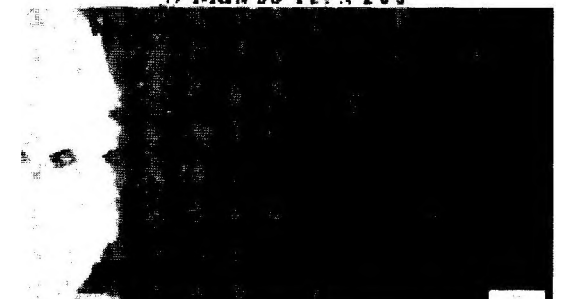
← Lớp thép B.G. Lớp phủ →
e) Mẫu số 11, x 200



← Lớp thép B.G. Lớp phủ →
f) Mẫu số 13, x 200



← L. thép B.G. Lớp phủ →
g) Mẫu số 15, x 200



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

Hình 3. Ảnh chụp tổ chức tế vi có vết đo độ cứng tế vi ($HV_{0,2}$)

Phân tích kết quả thí nghiệm trong bảng 1, bảng 2 và hình 3 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 $195,2 HV_{0,2}$. Độ cứng tế vi đo trên đường biên giới liên kết 2 lớp thép SS400 – lớp phủ plasma là $316 HV_{0,2}$, còn bên trong lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là $394,8 HV_{0,2}$, 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 $199,7 HV_{0,2}$, còn trên biên giới liên kết 2 lớp có giá trị bằng $237 HV_{0,2}$ và bên trong lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là $466,4 HV_{0,2}$, 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 $211,75 HV_{0,2}$, trên biên giới 2 lớp thép SS400 – lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ có giá trị bằng $120 HV_{0,2}$ và lớp phủ plasma là $492,6 HV_{0,2}$, 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 $196 HV_{0,2}$, trên biên giới 2 lớp là $294 HV_{0,2}$ và lớp phủ plasma

$Al_2O_3 - TiO_2$ là $521,875 HV_{0,2}$, 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 C.45 có giá trị bằng $172 HV_{0,2}$, trên biên giới 2 lớp là $144 HV_{0,2}$ và lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là $552,8 HV_{0,2}$, 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 $166,5 HV_{0,2}$, trên biên giới 2 lớp là $145 HV_{0,2}$ và lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là $567,2 HV_{0,2}$.

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: $L_p = 100 \div 200 mm$ (bước $50 mm$); $I_p = 400 \div 600 A$ (bước $100 A$); $G_p = 1,7 \div 1,9 kg/h$ (bước $0,1 kg/h$) và $v_p = 50 \div 60 mm/ph$. Kết quả thí nghiệm cho trong các bảng 3 và 4. Hình ảnh các vết đo độ cứng tế vi ($HV_{0,2}$) trên một số mẫu điển hình cho trên hình 3, e ÷ h.

Bảng 3. 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 $Al_2O_3 - TiO_2$ theo hướng đi vào lớp thép SS400, μm			Biên giới thép SS400 - lớp phủ $Al_2O_3 - TiO_2$ (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

Phân tích kết quả thí nghiệm trong bảng 1, bảng 2 và hình 3 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 195,2 HV_{0,2}. Độ cứng tế vi đo trên đường biên giới liên kết 2 lớp thép SS400 – lớp phủ plasma là 316 HV_{0,2}, còn bên trong lớp phủ plasma Al₂O₃ – TiO₂ là 394,8 HV_{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 199,7 HV_{0,2}, còn trên biên giới liên kết 2 lớp có giá trị bằng 237 HV_{0,2} và bên trong lớp phủ plasma Al₂O₃ – TiO₂ là 466,4 HV_{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 211,75 HV_{0,2}, trên biên giới 2 lớp thép SS400 – lớp phủ plasma Al₂O₃ – TiO₂ có giá trị bằng 120 HV_{0,2} và lớp phủ plasma là 492,6 HV_{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 196 HV_{0,2}, trên biên giới 2 lớp là 294 HV_{0,2} và lớp phủ plasma

Al₂O₃ – TiO₂ là 521,875 HV_{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 C.45 có giá trị bằng 172 HV_{0,2}, trên biên giới 2 lớp là 144 HV_{0,2} và lớp phủ plasma Al₂O₃ – TiO₂ là 552,8 HV_{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 μm (tính từ biên giới 2 lớp đi vào lớp thép) dao động trong 166,5 HV_{0,2}, trên biên giới 2 lớp là 145 HV_{0,2} và lớp phủ plasma Al₂O₃ – TiO₂ là 567,2 HV_{0,2}.

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

Độ cứng tế vi lớp phủ plasma Al₂O₃ – TiO₂ được xác định ở thang đo HV_{0,2} sau điều chỉnh công nghệ với: L_p = 100 ÷ 200 mm (bước 50 mm); I_p = 400 ÷ 600 A (bước 100 A); G_p = 1,7 ÷ 1,9 kg/h (bước 0,1 kg/h) và v_p = 50 ÷ 60 mm/ph. Kết quả thí nghiệm cho trong các bảng 3 và 4. Hình ảnh các vết đo độ cứng tế vi (HV_{0,2}) trên một số mẫu điển hình cho trên hình 3, e ÷ h.

Bảng 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	136	215
13	176	159	175	192
18	178	177	219	218
19	202	168	154	277
21		221	202	159
Trung bình	181,5	175,0	175,2	212,2

Bảng 4. Độ cứng tế vi trên biên giới với lớp thép SS400 và lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$:

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 $Al_2O_3 - TiO_2$ theo hướng đi vào lớp phủ, μm							Biên giới thép C45 - hợp kim $Al_2O_3 - TiO_2$ (B.G. 2 lớp)
	50	100	150	200	250	300	350	
11	251	438	451	425	-	-	-	215
13	129	513	414	296	436	436	-	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 các bảng 3, bảng 4 và hình 3, 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 215 $HV_{0,2}$, còn bên trong lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là 391,25 $HV_{0,2}$, 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 170 $HV_{0,2}$, trên biên giới liên kết 2 lớp với lớp phủ plasma là 192 $HV_{0,2}$ và bên trong lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là 361,6 $HV_{0,2}$, tức là cao hơn khoảng 2,12 lần so với độ cứng tế vi của lớp thép SS400;

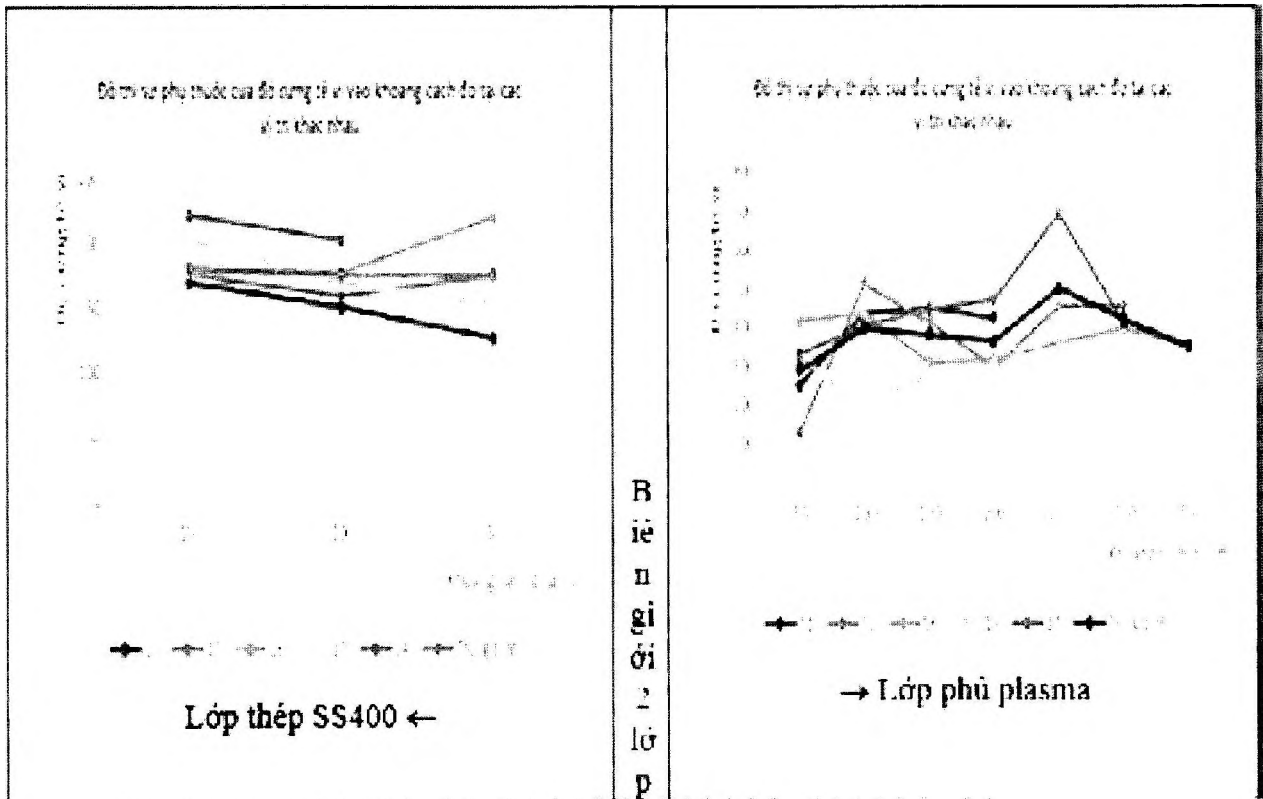
- Mẫu số 18: Độ cứng tế vi trung bình của lớp thép nền có giá trị là 191,3 $HV_{0,2}$ trên biên giới liên kết 2 lớp thép và lớp phủ plasma

là 218 $HV_{0,2}$ và lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là 368,7 $HV_{0,2}$, 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 174,67 $HV_{0,2}$ trên biên giới liên kết 2 lớp thép và lớp phủ plasma là 227 $HV_{0,2}$ và lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là 274 $HV_{0,2}$, 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 trị là 211,5 $HV_{0,2}$ trên biên giới liên kết 2 lớp thép và lớp phủ plasma là 159 $HV_{0,2}$ và lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ là 459,8 $HV_{0,2}$, tức là cao hơn khoảng 2,17 lần so với độ cứng tế vi trong lớp thép SS400.

Trên hình 4 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 4. 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 chống mài mòn cơ học cao hơn so với khi chưa có lớp phủ.

4. KẾT LUẬN

Từ 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 $Al_2O_3 - TiO_2$ và bên trong lớp phủ có quy luật sau:

- Lớp phủ plasma $Al_2O_3 - TiO_2$ 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 $Al_2O_3 - TiO_2$ 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.

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

Ngày nhận bài: **06/01/2022**

Ngày phản biện: **25/01/2022**

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 gồm $Al_2O_3 - TiO_2$ ứng dụng cho chi tiết máy chịu mài mòn cơ học”, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 06, tháng 6-2021.
- [8]. Hà Minh Hùng, Vũ Dương, Nguyễn Văn Đức (2021): “Nghiên cứu xác định chiều dày lớp phủ plasma vật liệu gồm $Al_2O_3 - TiO_2$ bằng phương pháp kim tương học”, Tạp chí Cơ khí Việt nam, số 12, 2021.