

Nghiên cứu mới trong phun plasma không khí tạo lớp phủ vô định hình

The new research in air-plasma spraying of amorphous coatings

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

^aFaculty of Mechanical Engineering, Duy Tan University, 550000, Danang, Vietnam

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

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

(Ngày nhận bài: 14/01/2022, ngày phản biện xong: 01/3/2022, ngày chấp nhận đăng: 02/3/2022)

Tóm tắt

Phun plasma trong khí quyển (APS) với lớp phủ vô định hình được áp dụng để thay thế vật liệu đắt tiền bằng vật liệu nền Fe và tiết kiệm khí trơ (Heli và Argon). Các thông số phun đặc trưng quan trọng như khoảng cách phun, vận tốc hạt, công suất plasma, độ nhám bề mặt, tỷ lệ hỗn hợp khí và lưu lượng khí đã được quan tâm trong các công bố trước đây. Tuy nhiên, mối tương quan đồng thời giữa tất cả thông số chưa được làm rõ. Điều được thừa nhận là tác động tương quan của quá trình dùng không khí đến các tính chất đặc trưng làm hạn chế các ứng dụng thực tế. Mục đích của nghiên cứu này là xác định rõ hơn ảnh hưởng của các thông số nêu trên đến chất lượng lớp phủ ma sát bằng vật liệu nền Fe. Kết quả của nghiên cứu cho thấy sự tương quan giữa các thông số phun chính, các tính chất đặc trưng của lớp phun và so sánh chúng với các vật liệu thông thường.

Từ khóa: độ bám dính; vật liệu nền Fe; phun plasma; thông số phun; độ chịu mòn.

Abstract

The atmospheric plasma spray (APS) with amorphous coatings is applied to determine the substitution of costly materials with Fe-based materials and to save the inert gas (helium and argon). The important characteristics of the spraying parameters determined by spray distance, particle velocity, plasma power, substrate roughness, gas mixture ratio, and gas flow rate have been underlined by previous publications. However, the simultaneous correlation between all parameters are not clarified yet. The correlative impact of the process with the air on characteristic properties which limit practical applications is acknowledged. The aim of this work is to more deeply define the effects of above-mentioned parameters on the antifriction layer quality in Fe-based materials. The findings of the study showed the correlation between the main spraying parameters, the characteristic properties and comparing them to conventional materials.

Keywords: Adhesion bond; Fe-based materials; plasma spray; spraying parameters; wear resistance.

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

1. Đặt vấn đề

Cần lưu ý rằng vật liệu phủ thường được sử dụng đều có giá cao, do đó làm giảm tính hiệu quả về mặt chi phí của quá trình phủ. Vật liệu nền Fe có giá thành tương đối thấp và có cơ tính tốt; do đó, chúng có khả năng thay thế các vật liệu nền Ni, WC đắt tiền hơn thường được sử dụng cho các lớp phủ chịu mài mòn. Và đáng chú ý, hầu hết các lớp phủ kim loại nền Fe tạo thành một cấu trúc vô định hình có độ bám dính tốt với vật liệu nền. Theo báo cáo [1] so với gang (nền), lớp phủ nền Fe cho thấy hệ số ma sát thấp hơn đáng kể. Độ chịu mài mòn và quá trình oxy hóa ở nhiệt độ cao của lớp phủ APS khi công suất hồ quang thay đổi, đã được nghiên cứu [2]. Người ta thấy rằng khi tăng công suất hồ quang, độ xốp và hàm lượng của các pha vô định hình trong lớp phủ giảm đi. Các lớp phủ tạo ra khi công suất hồ quang cao ít giảm trọng lượng do mài mòn và do quá trình oxy hóa ở nhiệt độ cao so với các lớp phủ tại công suất hồ quang thấp hơn. Các thông số phổ biến cần được kiểm soát là thành phần hóa học, cấu trúc pha, kích thước của bột, nhiệt độ nền, khí tạo plasma, luồng plasma, tốc độ cấp bột, góc phun và khoảng cách phun [3]. Đồng thời, với chất lượng của lớp phủ, nhiều nhà nghiên cứu cho rằng độ bám dính chủ yếu quyết định chất lượng của lớp phủ còn độ bền liên kết trong lớp phủ ảnh hưởng đến tuổi thọ của lớp phủ [4-7]. Điều quan trọng rút ra từ nghiên cứu này là dòng điện trong plasma đóng vai trò rất

quan trọng để tăng vận tốc hạt cũng như nhiệt độ bề mặt hạt. Các thông số vận hành chính của quá trình phun plasma ảnh hưởng đến sự phun phủ, nhưng tác giả của công trình [8] cho rằng vai trò của công suất đầu phun plasma ảnh hưởng đến dòng điện trong plasma. Sâu xa hơn, trong công trình nghiên cứu [9] ta thấy rằng các mẫu được phun dưới cường độ dòng điện cao hơn có khả năng bám dính và chịu mài mòn tốt hơn. Việc phân tích ảnh hưởng của các thông số chính đến độ bám dính để có được lớp phủ chịu mài mòn còn ít được khảo sát. Trên cơ sở phân tích đó, nghiên cứu này tập trung vào mối tương quan đồng thời giữa tất cả các thông số phun chính với bột vật liệu nền Fe, đặc biệt là ảnh hưởng của các thông số phun đến vận tốc hạt, độ bám dính và khả năng chịu mài mòn của lớp phủ.

2. Phương pháp nghiên cứu

Nhóm tác giả nghiên cứu cho rằng vận tốc hạt và nhiệt độ có ảnh hưởng lớn đến chất lượng lớp phủ. Phun plasma trong khí quyển đã được sử dụng trong thí nghiệm dùng thiết bị (SG-100 TAFA-Praxair, Hoa Kỳ). Khí chính là không khí và khí mang là nitơ. Thành phần hóa học của bột phủ nền Fe sử dụng (ký hiệu là X-5) được phân tích bằng phương pháp quang phổ tán sắc năng lượng với thiết bị SM-6510LV, Nhật Bản, số liệu thí nghiệm được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học của bột, % khối lượng

Mẫu	C	Cr	B	Mo	Ni	Mn	Si	Nb	V	W	Fe
X-5	0.73	5.0	0.25	4.20	-	1.25	0.84	0.54	1.20	-	Còn lại

Bột được trộn trong 10 giờ để thu được thành phần bột đồng nhất (hỗn hợp). Phân tích thành phần pha của bột và lớp phun phủ được tiến hành trên máy đo nhiễu xạ bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD, X-RAY

D5005/SIEMENS, Germany) ở nhiệt độ môi trường có bức xạ Cu-K α , góc quét 2 θ từ 10° đến 70°. Hàm lượng oxy trong lớp phủ cũng được khảo sát bằng cách sử dụng máy phân tích chiết xuất đốt chảy cao cấp (G8 Galileo, Đức). Để đo

vận tốc của các hạt, máy ảnh tốc độ cao đặc biệt Shimadzu HPV-1 được sử dụng [10]. Nhiệt độ của khối lượng trung bình của luồng plasma được xác định gián tiếp bằng entanpi. Người ta hay đánh giá nhiệt độ của khối lượng trung bình nhiều hơn so với nhiệt độ của từng hạt riêng lẻ. Entanpi là công suất luồng plasma chia cho lượng tiêu thụ của khí sơ cấp [11]. Sai số khi đánh giá mức tiêu thụ khí sơ cấp và entanpi không vượt quá 2,5% và 7%. Khả năng chịu mài mòn được đánh giá thông mẫu kiểm tra kiểu chốt trên đĩa, sử dụng thiết bị UMT-CETR (Mỹ) theo tiêu chuẩn ASTM G133 (áp lực tại đầu chốt lên đĩa là 5 N/mm^2 , tốc độ trung bình của đĩa là 420 vòng/phút, thời gian kiểm tra là 5 giờ, chế độ bôi trơn nhỏ giọt). Tất cả số liệu từ thử nghiệm được tính toán, và được xử lý bằng phương pháp bình phương tối thiểu.

Bảng 2. Thành phần, mức độ hao hụt các nguyên tố hợp kim, % và độ cứng của lớp phủ

Mác vật liệu liên	Chế độ	Thành phần nguyên tố hợp kim / mức độ hao hụt (% tương đối)											Độ cứng, HRC
		C	Cr	B	Mo	Ni	Mn	Si	N	Nb	V	W	
X-5	1	0.52	5.25	0.15	4.0	-	1.2	-	-	0.56	1.06	-	50-54
		28.8	5.0	40.0	4.8	-	4.0	-	-	3.7	11.7	-	
	2	0.41	5.2	0.1	4.0	-	1.0	-	-	0.5	1.1	-	45-52
		43.8	4.0	60.0	4.8	-	20.0	-	-	1.9	8.4	-	

Nhìn chung, thấy rằng có sự hao hụt của các nguyên tố (xem dòng dưới theo 2 chế độ phun). Đối với một số nguyên tố, sai số này không đáng kể và có thể thuộc về sai số phân tích hóa học (Cr, Mo, Ni, W). Còn các nguyên tố khác có sự oxy hóa (C, B, Mn, Si, Nb), hao hụt này có thể cao. Đáng chú ý là trong một số trường hợp, có ảnh hưởng của công suất luồng plasma (chế độ 2), không chỉ tất cả các nguyên tố mà còn tất cả các loại bột.

3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

Hai cấp hạt bột được sử dụng để phun: $<40\mu\text{m}$ và $40-100\mu\text{m}$.

3.1. Trường hợp nghiên cứu 1

Có hai chế độ phun:

1) Cường độ dòng điện $I = 120\text{A}$, hiệu điện thế $U = 200\text{V}$, lưu lượng khí $G = 2.34\text{g/s}$.

2) Cường độ dòng điện $I = 160\text{A}$, hiệu điện thế $U = 190\text{V}$, lưu lượng khí $G = 2.34 \text{ g/s}$.

Ở cả hai chế độ phun, khoảng cách phun không đổi $L = 150\text{mm}$.

Thành phần của các nguyên tố hợp kim và mức độ hao hụt của chúng, cũng như độ cứng của các lớp phủ, được xác định trong Bảng 2.

3.2. Trường hợp nghiên cứu 2

Có 2 chế độ:

1) Cường độ dòng điện $I = 120\text{A}$, hiệu điện thế $U = 200\text{V}$, lưu lượng khí $G = 1.19\text{g/s}$.

2) Cường độ dòng điện $I = 180\text{A}$, hiệu điện thế $U = 190\text{V}$, lưu lượng khí $G = 1.25\text{g/s}$.

Ở cả hai chế độ phun, khoảng cách phun không đổi $L = 120\text{mm}$. Điểm chú ý là nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng oxy trong lớp phủ trước khi phun (trong bột) và sau khi phun (trong lớp phủ). Kết quả phân tích được thể hiện trong Bảng 3. Có thể thấy từ Bảng 3, hàm

lượng oxy trong lớp phủ được tăng lên, nhưng đối với khả năng chịu mài mòn, điều này có ảnh hưởng song phương. Vì quá trình này được thực hiện ngoài không khí, việc tăng cường công suất luồng plasma có thể dẫn đến quá trình oxy hóa cao của các phần tử trong luồng plasma và dẫn đến hàm lượng oxy ngày càng tăng trong các lớp phủ. Trong một số trường hợp, nó có thể mang lại ảnh hưởng tích cực nếu xét về khả năng chịu mài mòn. Nhưng trong trường hợp uốn hoặc kéo, điều này ảnh hưởng tiêu cực, vì nó có thể được coi là tác nhân gây nứt. Cũng nhận thấy rằng trong chế độ 2, hàm lượng oxy trong lớp phủ giảm, có thể do vận tốc tăng, làm giảm thời gian bay của hạt, dẫn đến hạn chế tương tác với oxy trong môi trường.

Bảng 3. Thành phần của oxy trong bột và lớp phủ

Mẫu	Version	Thành phần của oxy, %	
		Trong bột trước khi phun	Trong lớp phủ sau khi phun
X-5	1	0.14	2.15
	1	0.13	1.58
	2	0.14	1.60
	2	0.12	1.55

3.3. Trường hợp nghiên cứu 3

Để so sánh khả năng chịu mài mòn, lớp phủ bằng vật liệu ma sát truyền thống Ni85 + Al15 đã được thực hiện để đối sánh. Có 6 chế độ như sau: dòng điện thay đổi (xem trên từng đồ thị Hình 1).

1) Vật liệu Ni85+Al15, kích thước hạt 40-100 μ m; đường kính nòng phun 9mm;

2) Vật liệu X-5, kích thước hạt 40-100 μ m; đường kính nòng phun 9mm;

3) Vật liệu X-5, kích thước hạt <40 μ m; đường kính nòng phun 9mm;

4) Vật liệu X-5, kích thước hạt < 40 μ m; đường kính nòng phun 7mm;

5) Vật liệu X-5, kích thước hạt 40-100 μ m; đường kính nòng phun 7mm;

6) Vật liệu X-5, kích thước hạt 40-100 μ m; đường kính nòng phun 9mm (Riêng chế độ phun này chỉ có I = 240A).

Sự thay đổi của vận tốc hạt phụ thuộc vào tốc độ dòng khí đối với từng phiên bản của lớp phủ được biểu thị trong Hình 1 (a, b, c, d, e, f).

Từ các Hình 1 (a, b), để đánh giá ảnh hưởng của cường độ dòng điện và tốc độ dòng khí lên vận tốc của các hạt, người ta đề xuất một công thức thực nghiệm sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu, trong đó I là dòng điện, G là lưu lượng khí:

$$V = 11 \cdot I^{0.3} \cdot G^{0.9} \text{ cho vật liệu X-5} \quad (1)$$

$$V = 27 \cdot I^{0.1} \cdot G^{0.7} \text{ cho vật liệu Ni85+Al15} \quad (2)$$

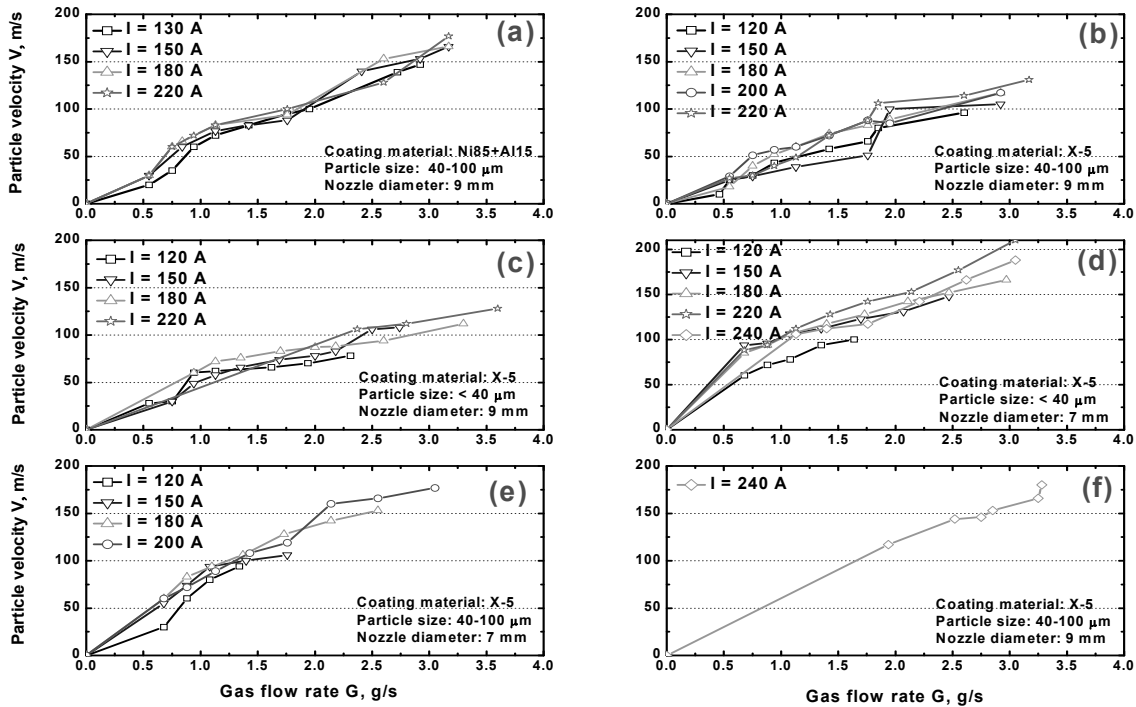
Từ các công thức (1) và (2), cho thấy lưu lượng khí tác dụng lên vận tốc hạt mạnh hơn cường độ dòng điện. Sự khác biệt về hệ số và số mũ có thể được giải thích do các tính chất vật lý khác nhau (cụ thể là mật độ, kích thước và hình thái của các hạt). Nói chung, từ tất cả các chế độ phun (nghiên cứu trường hợp 4), vận tốc của các hạt tăng cùng với sự gia tăng của lưu lượng khí và cường độ dòng điện.

Từ các Hình 1b và 1c thấy rằng không có ảnh hưởng rõ ràng của kích thước hạt (<40 μ m) lên vận tốc - gần như cùng một bậc. Điều đó có thể do tia lửa (khói) của luồng plasma ngăn cản việc theo dõi trực quan. Có ý kiến cho rằng các phần tử nhỏ hơn của bột cháy hết và gây ra khói. Từ phía bên kia, các hạt nhỏ hơn tiếp xúc với lớp nền nhanh đến mức chúng không lấp lánh (đỏ sáng).

Từ các Hình 1b và 1e, khi đường kính nòng phun thay đổi từ 9mm đến 7mm, thấy rằng vận tốc của các hạt X-5 trong các điều kiện phun tương tự (cường độ dòng điện và lưu lượng khí) đã tăng lên 1,5 lần. Điều tương tự cũng được ghi nhận từ các Hình 1c và 1d, đối với kích thước hạt nhỏ. Nhưng ở cùng một tốc độ dòng

khí, dòng điện càng cao thì tốc độ của hạt càng tăng nhanh. Hiện tượng này được giải thích do hiệu ứng nhiệt động lực học của luồng plasma do cấu tạo của đầu phun và công suất của nó đối với vận tốc của hạt. Cuối cùng, đối với chế độ phun mạnh nhất (I = 240A, U thay đổi từ

260 đến 330V, công suất plasma là 80kW), vận tốc hạt đạt vận tốc tối đa 180m/s (Hình 1f). Chế độ này cho thấy ảnh hưởng một phần của công suất plasma lên vận tốc của hạt. Ảnh hưởng của nó đối với độ bám dính sẽ được xác định trong trường hợp nghiên cứu tiếp theo.



Hình1. Sự thay đổi của vận tốc hạt phụ thuộc vào lưu lượng khí

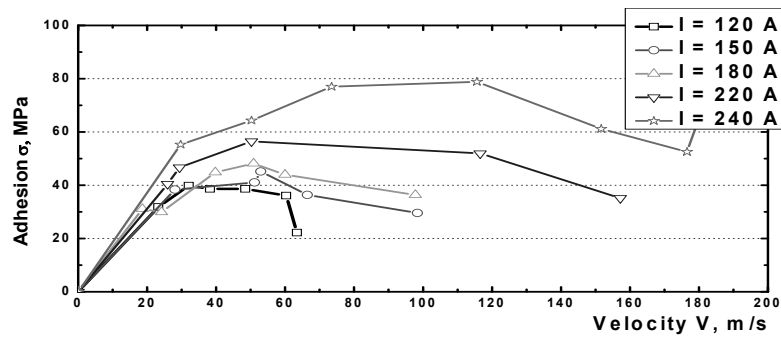
Ghi chú: Trên các Hình.1 (a,b,c,d,e,f):

- Trục đứng biểu thị vận tốc hạt ký hiệu chữ V (particle velocity), đơn vị m/s.
- Trục ngang biểu thị lưu lượng khí, ký hiệu chữ G (Gas flow rate), đơn vị g/s.
- Vật liệu phun (coating material), Kích thước hạt (particle size) đo bằng μm.
- Đường kính bép (Nozzle diameter đo bằng mm.

3.4. Trường hợp nghiên cứu 4

Vật liệu X-5, kích thước hạt 40-100μm; đường kính nòng 9mm; dòng điện thay đổi trong phạm vi 120, 150, 180, 200, 220A; lưu lượng khí tương ứng 0,46-3,17g/s. Kết quả đo

độ bám dính và vận tốc được thể hiện trong Hình2. Khi tốc độ tăng lên, có sự chênh lệch ít về độ bám dính giữa các chế độ dòng điện khi vận tốc nhỏ (<40m/s), nhưng trong trường vận tốc tăng cao hơn, độ bám dính đang tiến gần đến 80MPa, vượt quá giới hạn tối đa trong các công bố gần đây [12]. Chiều hướng tăng độ bám dính là cùng với việc tăng công suất plasma, cực đại chuyển dịch theo hướng vận tốc cao hơn. Có nghĩa là độ bám dính phụ thuộc vào cả vận tốc và entanpi (công suất plasma). Có đề xuất công thức thực nghiệm cho thấy mối tương quan giữa độ bám dính, vận tốc, entanpi và dòng điện: $\sigma = 0.003 \cdot V^{0.023} \cdot \Delta H^{0.97} \cdot I^{0.089}$. (3)



Hình 2. Mối liên hệ giữa độ bám dính và vận tốc hạt trong sự thay đổi của công suất phun (bột X-5)

3.5. Trường hợp nghiên cứu 5

Để đánh giá ảnh hưởng của cường độ dòng điện đến khả năng chịu mài mòn và độ bám dính, thí nghiệm được mô tả trong Bảng 4. Mặt khác, giữ nguyên cường độ dòng điện, nhưng thay đổi lưu lượng khí, để khảo sát khả năng chống mài mòn và độ bám dính, tất cả các thông số của các thí nghiệm này được thể hiện trong Bảng 5.

Từ các Bảng 4, 5, xác định rằng khi tăng dòng điện (công suất plasma), vận tốc của các hạt tăng lên và dẫn đến tăng khả năng chống mài mòn của lớp phủ X-5. Khi tốc độ dòng khí thấp, khả năng chịu mài mòn tương đối thấp. Nhưng cùng với sự gia tăng của tốc độ dòng khí, khả năng chịu mài mòn thay đổi phức tạp. Vận tốc nhỏ gây ra điều kiện tốt cho việc nóng chảy hạt và độ kết dính của các hạt trong lớp phủ được nâng cao, do đó, khả năng chịu mài mòn được cải thiện. Khi tiếp tục tăng tốc độ dòng plasma và giữ cường độ dòng điện sẽ làm giảm độ kết dính trong lớp phủ, cũng như khả

năng chịu mài mòn do điều kiện nóng chảy của hạt vật liệu phun kém hơn. Việc tiếp tục tăng vận tốc của các hạt ảnh hưởng đến độ bám dính và độ kết dính, dẫn đến khả năng chịu mài mòn, vì hệ số vận tốc (động năng) bắt đầu đóng một vai trò đáng kể. Nói chung, xu hướng thay đổi độ bền mài mòn từ tốc độ dòng chảy của không khí gần như trùng khớp với sự thay đổi độ bám dính, ngoại trừ tốc độ dòng khí thấp. Có thể hiểu là do vận tốc thấp ảnh hưởng đến độ kết dính tốt nhưng độ bám dính kém.

Bảng 4. Khả năng chịu mài mòn và độ bám dính của X-5 phụ thuộc vào cường độ dòng điện

Mẫu	Cường độ dòng điện I, A	Lưu lượng khí G, g/s	Độ chịu mài mòn tương đối	Độ bám dính, MPa
1	120	1,42	58	36
2	150		53	41
3	180		42	54

Bảng 5. Khả năng chịu mài mòn và độ bám dính của X-5 phụ thuộc vào tốc độ dòng khí

Mẫu	Cường độ dòng điện I, A	Lưu lượng khí G, g/s	Độ chịu mài mòn tương đối	Độ bám dính, MPa
1	150	0.55	21	22
2		1.13	53	41
3		1.76	38	35
4		2.42	65	30
5	180	0.75	28	45
6		1.42	68	56
7		1.76	42	54
8		1.95	60	30

4. Kết luận

- Nhìn chung vận tốc hạt ảnh hưởng đến độ bám dính của lớp phủ. Cụ thể, cùng với sự gia tăng của vận tốc, độ bám dính tăng cho đến một giá trị xác định (phụ thuộc vào công suất plasma), đạt cực đại và giảm nếu vận tốc tăng thêm nữa. Khi nâng cao công suất plasma vượt ngưỡng thông thường, cực đại này sẽ tăng lên theo hướng công suất cao hơn.

- APS sử dụng không khí làm khí tạo plasma cho vật liệu nền Fe X-5 có ưu và nhược điểm đồng thời là đạt được độ bám dính tốt nhưng khả năng chịu mài mòn thấp, phụ thuộc vào việc lựa chọn các thông số phun tối ưu.

- Công thức thực nghiệm cho thấy mối tương quan tương đối giữa các thông số định tính của lớp phủ và các thông số chế độ phun bao gồm cường độ dòng điện, lưu lượng khí, công suất plasma, entanpi của đầu phun, vận tốc hạt. Điều này có thể được áp dụng không chỉ cho thiết kế chế tạo sơ bộ đầu plasma mà còn cho quy trình công nghệ phun phủ.

Tài liệu tham khảo

- [1] M.S.Priyan, P.Hariharan (2014), Wear and corrosion resistance of Fe based coatings by HVOF sprayed on gray cast -iron for automotive application, *Tribology in Industry* 36 (4) 394-405
- [2] Jinheng Luo, Na Shi, Ya-Zhe Xing, Chaoping Jiang, Yongnan Chen (2019), *Effect of arc power on the wear and high-temperature oxidation resistance of plasma sprayed Fe-based amorphous coatings*, High-Temp.Mater.Proc.38,639-646
- [3] Mohamed S. Morsi, Soha A. Abd El Gwad, Madiha.A. Shoeib, Khalid.F. Ahmed (2012), Effect of air plasma spray parameters on coating performance in zirconia- based thermal barrier coatings, *International Journal of Electrochemical Science* 7,2811-2831
- [4] E.Altuncu, F.Ustel(2012), Adhesion properties of the plasma spraying coatings, *METAL 2012*<http://metal2012.tanger.cz/files/proceedings/02/reports/393.pdf>.
- [5] A.Behera, S.C.Mishra (2012), Dependence of adhesion strength of plasma spray on coating surface properties, *Journal of Materials & Metallurgical Engineering* 2(2),23-30
- [6] J.Matejisek, M.Vilemova, R.Musalek, P.Sachr and J.Hornik(2013), The influence of interface characteristics on the adhesion/cohesion of plasma sprayed tungsten coatings, *Coatings* 3 ,108-125 doi :10.3390/coatings302018
- [7] A.Rahim, M.Sahab, N.H.Saad, S.Kasolang and J.Saedon(2012),Impact of plasma spray variables parameters on mechanical and wear behaviour of plasma sprayed Al₂O₃ 3%wt TiO₂coating in abrasion and erosion application, *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS2012)*, *Procedia engineering* 41,1689-1695.
- [8] B.K.Swain, S.S.Mohapatra, A.Pattanaik, S.K.Samal, S.K.Bhuyan, K.B Barik, D.K.Sahoo, A.Behera(2018), Sensitivity of process parameters in atmospheric plasma spray coating, *Journal of Thermal Spray and Engineering* 1(1),1-6.
- [9] O.J.Gerald, L.Wenge, Z.Y.Tao, L.C.Long, L.Qiang(2020),Influence of plasma spraying current on the microstructural characteristics and tribological behaviour of plasma sprayed Cr₂O₃ coating, *Journal of the Spanish Ceramic and Glass Society* ,doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.03.007
- [10] N.A.Buchman,C.Cierpka, C.J.Kahler(2014),Ultra high speed 3D astigmatic particle tracking velocimetry: application to particle-laden supersonic impinging jets, *Exp fluids*, 55:1842 .
- [11] N.Zhang, F.Sun, L.Zhu, M.P Planche, H.Liao, C.Dong and C.Coddet(2012),Measurement of specific enthalpy under very low pressure plasma spray condition, *Journal of Thermal Spray Technology* 21 , 489-495
- [12] V.Matikainen, H.Koivuluoto, A.Milanti,P.Vuoristo(2015),Advanced coatings by novel high-kinetic thermal spray processes, *Materia* 1/2015 TIEDE& TEKNIKA, 46-50.