

## Thay đổi thiết kế đầu phun plasma dùng không khí

### Design modification of torch for air-plasma spraying

Vũ Dương<sup>a,b\*</sup>, Nguyễn Thanh Tùng<sup>a,b</sup>  
Vu Duong<sup>a,b\*</sup>, Nguyen Thanh Tung<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Khoa Cơ khí, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>a</sup>Mechanical Engineering Faculty, Duy Tan University, 55000, Danang, Vietnam

<sup>b</sup>Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>b</sup>Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

(Ngày nhận bài: 05/01/2022, ngày phản biện xong: 15/01/2022, ngày chấp nhận đăng: 28/01/2022)

### Tóm tắt

Phun plasma trong khí quyển (APS) được ứng dụng phổ biến trong ngành công nghiệp. Cho đến nay, các khí chính phổ biến được sử dụng là: Khí trơ, khí hoạt hóa, khí trơ trong hỗn hợp khí hoạt hóa. Khí trơ như Argon hoặc Heli là loại khí đơn nguyên tử và chúng có dòng plasma nhiệt độ cao nhưng entanpy không quá cao. Entanpy của dòng plasma có thể tăng lên nếu một phần khí hoạt hóa được thêm vào. Trong môi trường của khí trơ, các hạt (phun) và chất nền được bảo vệ khỏi quá trình oxy hóa. Mặt khác, khí hoạt hóa như không khí được thêm vào để tạo ra entanpy cao. Tùy vào vật liệu phủ (hạt bột) và vật liệu nền để chọn khí chính (sinh plasma) cho phù hợp. So với khí trơ, không khí rẻ hơn và đặc biệt là trong việc phun vật liệu gốm, đây là lợi thế rõ ràng. Dựa trên cơ sở này, bài báo tập trung thiết kế hệ thống phun plasma sử dụng không khí làm khí chính. Đó là một số giải pháp cụ thể trong thiết kế đầu phun plasma. Thí nghiệm được thiết lập nhằm ứng dụng bột vô định hình để kiểm chứng hoạt động của hệ thống.

*Từ khóa:* entanpy; khí trơ; khí hoạt hóa; độ bám dính; vận tốc dòng.

### Abstract

The atmospheric plasma spray (APS) is a popular application in the industry. Until now, the common primary gases are inert gases, active gases, and inert gases in the mixture with the active ones. The inert gas like Argon or Helium are the monoatomic and have the high temperature of plasma flow under but not too high enthalpy. The enthalpy of the plasma flow can be increased, if a small percentage of the active gases is added. In the environment of the inert gas, the particles and substrate are protected from the oxidation process. On the other hand, the active gas like the air is added to provide the high enthalpy. Depending on the coating material (powder particle) and the substrate material, the primary gas will be chosen properly. The air is much cheaper, and especially in spraying the ceramic material, it showed a greater advantage in comparison with the inert gas. Based on this conception, the work focuses on designing the system for plasma spraying using the air as primary gas. There are some specific solutions in designing plasma torch. The experiment was set for the application of amorphous powder to verify the operation of this system.

*Keywords:* enthalpy; inert gas; active gas; adhesion bond; flow rate.

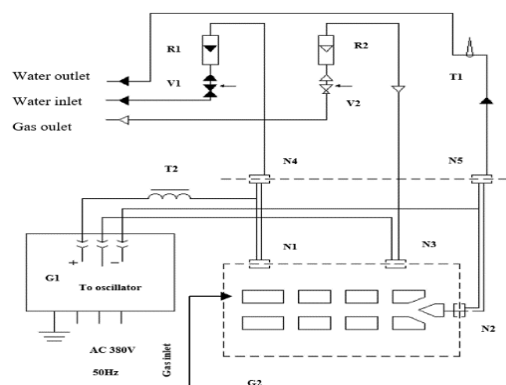
\* Corresponding Author: Vu Duong; Mechanical Engineering Faculty, Duy Tan University, 55000, Danang, Vietnam; Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam  
Email: duongvuaustralia@gmail.com

## 1. Giới thiệu

Cấu hình của đầu phun có ảnh hưởng lớn đến các đặc tính của dòng plasma. Các thông số chính của cấu hình đầu phun là: Đường kính béc đầu phun; chiều dài nòng đầu phun; cấu hình nòng đầu phun và tốc độ dòng khí. Ảnh hưởng của tốc độ dòng khí và đường kính của nòng đầu phun lên sự phóng điện plasma đã được nghiên cứu trong [1]. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả chỉ khảo sát các khí trơ như: Argon, Nitơ và Heli [2]. Có một số thiết kế đầu phun đã được thử nghiệm để đạt hiệu quả chuyển động tối ưu của bột phun trong luồng plasma. Để hạn chế sự tiếp xúc với oxy từ môi trường xung quanh, đã có một số phương pháp thiết kế đầu phun plasma. Một trong những phương pháp này là ứng dụng hiệu ứng xoáy để tạo ra hình nón phun nhằm giữ cho quỹ đạo hạt có độ lệch nhỏ [3]. Để thực hiện thiết kế này, cần phải cải tiến cách cấp bột [4] hoặc thay đổi các đặc tính của vật liệu phun như cấp liệu ở dạng huyền phù [5]. Có một giải pháp độc đáo đã được giới thiệu trong thiết kế kiểu đầu phun plasma có 2 ngăn để phun vận tốc cao [6]. Nhưng đây là giải pháp quá phức tạp trong thực tế. Trong khi đó, hiệu suất hợp lý của luồng plasma có thể đạt được nhờ cấu tạo đơn giản hơn của đầu phun plasma. Thiết kế này là sự kết hợp hợp lý giữa đường kính, chiều dài của nòng đầu phun, công suất của đầu phun plasma và tốc độ dòng khí. Trong bài báo này, sơ đồ chính của hệ thống và cấu tạo đặc biệt của đầu phun plasma sẽ được giới thiệu. Ứng dụng của nó được minh họa trong trường hợp phun lớp phủ vô định hình sử dụng không khí làm khí chính và khí thứ cấp.

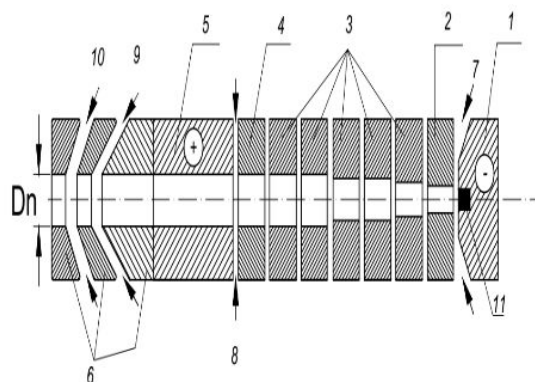
## 2. Phương pháp nghiên cứu

Sơ đồ chung của hệ thống phun plasma này được thể hiện trong Hình 1.



**Hình 1.** Sơ đồ chung của hệ thống phun plasma

G1 là nguồn điện; G2 là đầu phun plasma; R1 & R2 là các lưu lượng kế; V1 & V2 là các van; N1, N2, N3, N4, N5 là các núm; T1 là nhiệt kế; T2 là bướm ga. Nguồn điện là nguồn điện một chiều có đường đặc tuyến vôn - ampe dốc xuống, điện áp không tải 300V, giới hạn điện áp điều chỉnh  $50 \div 600V$ . Hồ quang plasma được tạo ra theo sơ đồ hai bước. Chất làm mát là nước sử dụng đầu vào và đầu ra, thông qua van V1 và lưu lượng kế R1. Nhiệt kế T1 được sử dụng để đo nhiệt độ và cung cấp dữ liệu để tính toán entanpy của luồng plasma. Độ chính xác của lưu lượng kế này là 2,5%. Áp suất của dòng nước vào là  $0,4 \div 0,6 MPa$ . Khí sơ cấp và khí thứ cấp được cấp qua van V2. Tốc độ dòng chảy của khí được xác định bởi lưu lượng kế R2. Bướm ga T2 được dùng để điều hòa xung. Cấu tạo của đầu phun plasma được thể hiện trong Hình 2.



**Hình 2.** Cấu tạo của đầu phun plasma

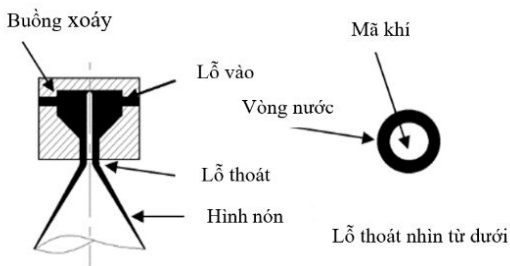
Trong Hình 2:

1-Catod; 2-Khoang đầu; 3-Khoang trung gian; 4-Khoang cuối; 5-Anod; 6-Kim phun hình khuyên cấp bột; 7-Cửa vào khí; 8-Khí bảo vệ; 9-Khí mang bột; 10-Khí tập trung; 11-Thanh catod; Dn- đường kính lỗ.

Số lượng của khoang trung gian phụ thuộc vào điện áp yêu cầu giữa catod và anod của đầu phun. Mặt khác, chiều dài nòng đầu phun phải hợp lý để tránh sự cố đoản mạch hoặc bỏ qua vòng cung. Khoang trung gian này cách điện với catod và anod. Số lượng khoang trung gian dựa trên cơ sở:

$$\frac{U_{total}}{n} \leq U_k + U_a \quad (1)$$

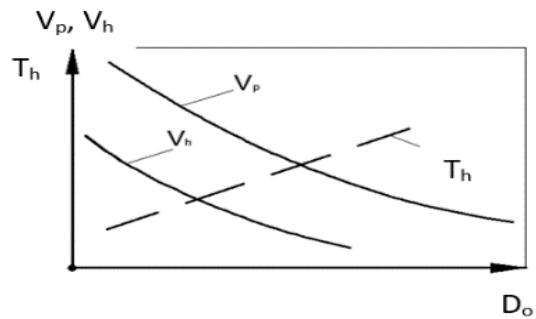
Trong đó:  $U_{total}$  là điện áp giữa tất cả các khoang;  $U_k$  và  $U_a$  là điện thế giữa cực âm và cực dương tương ứng. Liên quan đến đường kính của lỗ anod  $d_1$ , khoang trung gian  $d_2$  và vòi phun  $d_3$  có thể bằng nhau hoặc  $d_1 > d_2 > d_3$ . Lợi thế của thiết kế nòng này là nó giúp hạn chế dao động không mong muốn của chiều dài và điện áp hồ quang. Điểm mấu chốt trong kết cấu của đầu phun plasma là bộ phận cấp bột phun có luồng khí xoáy tập trung [7,8]. Ưu điểm của thiết kế này là nó đảm bảo bột phun hướng trên trục của luồng plasma, là nơi có vận tốc và nhiệt độ cao. Nó tăng hiệu quả nóng chảy, gia tốc của hạt và năng suất phun. Đường kính béc phun ảnh hưởng đến tốc độ và nhiệt độ của hạt trong luồng plasma (thể hiện ở Hình 3).



Hình 3. Kim phun hình khuyên

Thông thường,  $D_0 = 3-10\text{mm}$ . Sự ảnh hưởng của đường kính béc phun plasma đến tốc độ của hạt và luồng plasma, nhiệt độ của hạt được

thể hiện ở Hình 4 [9]. Trong đó:  $V_p$ ,  $V_h$  là vận tốc của hạt và luồng plasma;  $T_h$  là nhiệt độ của hạt;  $D_0$  là đường kính của béc phun plasma.



Hình 4. Các thông số cấu tạo của đầu phun

Tính năng độc đáo của kết cấu này là để tạo ra plasma, che chắn, tải vật liệu phun và dẫn hướng tập trung, chỉ sử dụng không khí. Không khí tạo ra plasma có entanpy cao đồng thời dễ tiếp cận và rẻ hơn, dựa trên cơ sở so sánh nhiệt lượng của các khí như Heli, Nitơ và không khí [10]. Thanh catot được làm bằng vật liệu chịu nhiệt như Hf hoặc Zr để hạn chế sự ăn mòn của không khí. Dữ liệu của thí nghiệm cho thấy tuổi thọ của catod là 15h hoặc 300 lần đốt cháy.

### 3. Thí nghiệm

Để chứng minh hoạt động của hệ thống này, tác giả đã đưa ra thực nghiệm phun vật liệu vô định hình trên nền thép cacbon thấp 1020. Trong nghiên cứu này, cần xác định vận tốc hạt, nhiệt độ của hạt, độ bám dính, sự ảnh hưởng của công nghệ và thông số kết cấu đến chất lượng cuối cùng của lớp phủ - độ bám dính. Có 2 kích thước cỡ hạt:  $\leq 40\mu\text{m}$  và  $40 \div 100\mu\text{m}$ . Phun plasma trong khí quyển được sử dụng trong thí nghiệm trên thiết bị phun chuyên dụng (SG-100 TAFE - Praxair, US). Khí chính là không khí và khí vận chuyển cũng là không khí. Để đo vận tốc của các hạt phun, dùng máy ảnh tốc độ cao đặc biệt Shimadzu HPV-1 [11]. Nhiệt độ trung bình của luồng plasma được xác định gián tiếp bởi entanpy theo tiêu chuẩn ASTM E341-08 (2020) [12]. Tất cả dữ liệu từ thí nghiệm được tính toán, sử dụng phương

pháp bình phương tối thiểu. Kích thước hạt của bột đã được phân tích bởi thiết bị Cilas-1090 [13]. Phân tích thành phần pha của bột và lớp phun phủ được đo bằng máy đo nhiễu xạ bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD, X-RAY D5005/SIEMENS, Germany) tại nhiệt độ 25° C với bức xạ Cu- K $\alpha$ , góc quét 2 $\theta$  từ 10° đến 70°. Hàm lượng của oxy trong lớp phủ được xác định bằng cách sử dụng máy phân tích chiết xuất tan chảy (G8 Galileo, Germany). Độ bám của lớp phủ trên nền vật liệu thép được xác định bởi máy kéo nén vạn năng (Model HT-2101A-300, Taiwan) theo tiêu chuẩn ASTM C633. Thành phần hóa học của một số bột nền Fe được phân tích bằng phương quang phổ tán sắc năng lượng (SEM, SM-6510LV, Japan), dữ liệu thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 1.

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

| Code | C    | Cr   | B    | Mo   | Ni | Mn   | Si   | Nb   | V    | W    |
|------|------|------|------|------|----|------|------|------|------|------|
| Fe-1 | 0.41 | 12.5 | -    | 0.70 | -  | 0.54 | 0.66 | 0.73 | 0.35 | 6.10 |
| Fe-2 | 0.73 | 5.0  | 0.25 | 4.20 | -  | 1.25 | 0.84 | 0.54 | 1.20 | -    |

Ghi chú: còn lại là thành phần của Fe trong hỗn hợp.

Thành phần của bột được trộn bằng máy trong 10h để thu được thành phần bột đồng nhất (hỗn hợp).

### 3.1. Trường hợp nghiên cứu 1

Khí tạo ra plasma là không khí. Giới hạn kích thước của bột là 40-100 $\mu$ m. Có 2 phương án:

1) Cường độ dòng điện I = 120A, hiệu điện thế U = 200V, tốc độ dòng khí G = 1.19g/s.

2) Cường độ dòng điện I = 180A, hiệu điện thế U = 190V, tốc độ dòng khí G = 1.25g/s

Trong 2 chế độ phun, khoảng cách phun luôn giữ L = 120mm. Độ cứng của lớp phủ trước và sau khi nhiệt luyện được đo theo tiêu

chuẩn ISO 6507-2, sử dụng thiết bị đo độ cứng FM-100 (Japan), được trình bày trong Bảng 2.

**Bảng 2.** Độ cứng lớp phủ trước và sau nhiệt luyện

| Co de | Ver | Độ cứng trước khi nhiệt luyện, HRC | Nhiệt luyện    | Độ cứng sau khi nhiệt luyện, HRC |
|-------|-----|------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| Fe-1  | 1   | 8-30                               | 4 giờ - 540° C | 37-45                            |
|       | 2   | 29-31                              | 4 giờ - 540° C | 37-48                            |
| Fe-2  | 1   | 40-42                              | 4 giờ - 800° C | 43-45                            |
|       | 2   | 41-45                              | 4 giờ - 800° C | 54-56                            |

Vì quá trình phun được thực hiện trong không khí, nên việc thực hiện phân tích thành phần oxy của bột (trước khi phun) và lớp phủ (sau khi phun) là rất quan trọng. Kết quả được thể hiện trong Bảng 3.

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

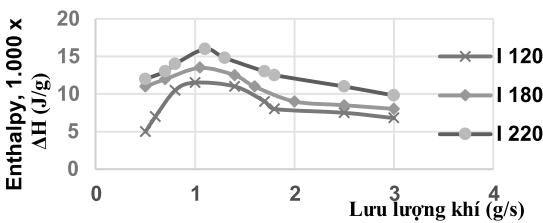
| Cod e | Ver | Thành phần của oxy, %    |                            |
|-------|-----|--------------------------|----------------------------|
|       |     | Trong bột trước khi phun | Trong lớp phủ sau khi phun |
| Fe-1  | 1   | 0.30                     | 1.33                       |
|       | 2   | 0.30                     | 0.07                       |
| Fe-2  | 1   | 0.14                     | 2.15                       |
|       | 2   | 0.14                     | 1.60                       |

Có thể thấy ở Bảng 3, thành phần oxy trong lớp phủ tăng lên, nhưng đối với khả năng chống mòn thì điều này có ảnh hưởng song phương. So với phun HVOF, thành phần oxy trong lớp phun phủ bằng APS cao hơn 3 - 4 lần [14]. Đó là do khí tạo ra plasma là không khí và vận tốc hạt trong APS nhỏ hơn trong phun HVOF. Nhưng mặt khác, sự hiện diện của oxit sắt trong lớp phủ làm giảm độ cứng giúp tăng khả năng chịu mài mòn của lớp phủ này.

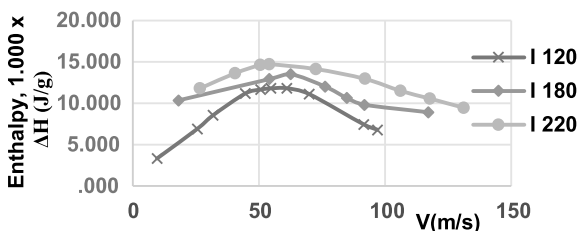
**3.2. Trường hợp nghiên cứu 2**

Sự ảnh hưởng của công suất plasma và lưu lượng khí lên Entanpy ( $\Delta H$ ) thể hiện ở Hình 5. Sự ảnh hưởng của công suất plasma và vận tốc hạt lên Entanpy thể hiện ở Hình 6. Khoảng biến thiên của lưu lượng khí là 0.5 g/s trong khoảng: 0.5 ÷ 3g/s. Vật liệu phun là bột Fe-2; Các chế độ phun:

- 1) x - cường độ dòng điện I = 120A;
- 2)  $\blacklozenge$ - cường độ dòng điện I = 180A; 3)  $\circ$  – cường độ dòng điện I = 220A;



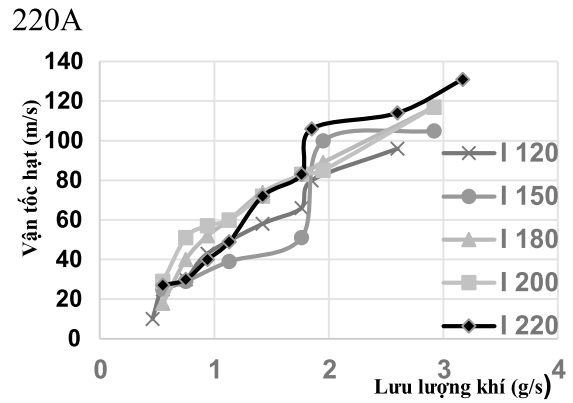
**Hình 5.** Ảnh hưởng của công suất và lưu lượng khí đến Entanpy



**Hình 6.** Ảnh hưởng của công suất và vận tốc hạt đến Entanpy

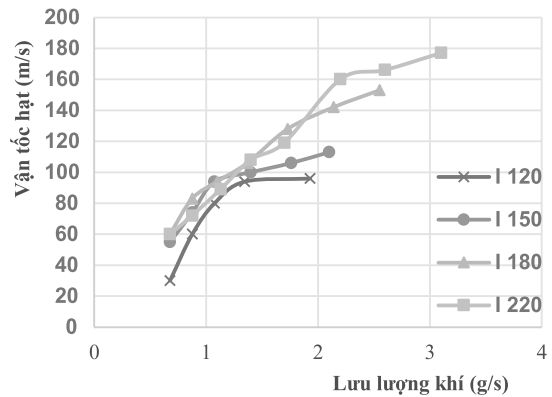
**3.3. Trường hợp nghiên cứu 3**

Nghiên cứu quan hệ giữa công suất của luồng plasma, đường kính béc phun, lưu lượng khí và vận tốc hạt. Có 2 cấu tạo của đầu phun plasma với đường kính: 7 mm và 9 mm. Tất cả dữ liệu của thí nghiệm được thể hiện trong Hình 7 và Hình 8. Trong hai thí nghiệm, cường độ dòng điện được tùy biến từ 120 đến 220 A; lưu lượng khí từ 0,5 đến 3 g/s. Vật liệu phun là bột Fe-2. Để phân biệt các đường cong được vẽ trong hình này, các ký hiệu như sau: x – I = 120A; o – I = 150 A;  $\Delta$  - I = 180A;  $\square$  – I = 200A;  $\blacklozenge$  – I = 220A



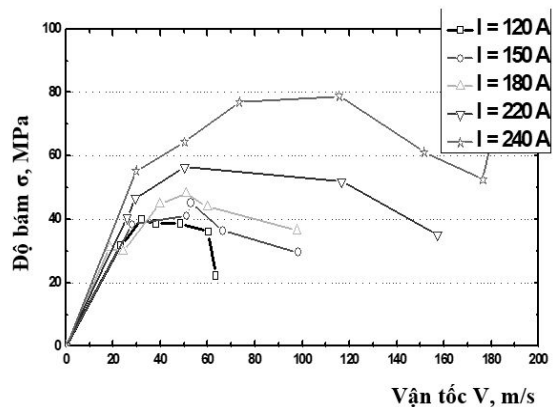
**Hình 7.** Đường kính nòng đầu phun - 9mm

**3.4. Trường hợp nghiên cứu 4**



**Hình 8.** Đường kính nòng đầu phun - 7 mm

Độ bám dính của lớp phủ trên nền thép được xác định liên quan đến công suất plasma và vận tốc hạt. Vật liệu phun là Fe-2. Đường kính của béc phun plasma là 9 mm. Kết quả đo độ bám dính và vận tốc hạt được thể hiện ở Hình 9.



**Hình 9.** Quan hệ giữa độ bám dính và vận tốc khi công suất phun thay đổi

Dựa vào Hình 9, đề suất công thức thực nghiệm, sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất để chỉ ra mối quan hệ giữa độ bám dính và cường độ dòng điện, lưu lượng của dòng khí:

$$\sigma = I^{X_1} G^{X_2} \cdot \exp(X_3/G) \cdot X_4 \quad (2)$$

Trong đó:  $\sigma$  là độ bám dính [MPa];  $I$  là cường độ dòng điện [A];  $G$  lưu lượng khí [g/s]. Các giá trị của  $X$ :  $X_1 = 0.6362$ ;  $X_2 = -1.9692$ ;  $X_3 = -1.8503$ ;  $X_4 = 11.5676$ . Công thức (2) này phù hợp trong phạm vi cường độ dòng điện  $I = 120-220$  A.

#### 4. Kết quả và thảo luận

Trong trường hợp nghiên cứu 1, từ Bảng 2, độ cứng sau khi nhiệt luyện cao hơn trước khi nhiệt luyện. Lý do ở đây là pha vô định hình được biến đổi một phần thành cấu trúc tinh thể nano và nó có thể phân tán trong lớp phủ để tăng cường độ bền cho lớp phủ. Nguyên nhân tiếp theo có thể là khi nhiệt độ ủ là  $650^\circ\text{C}$ , pha giàu Cr, Mo hình thành trong lớp phủ và chúng đóng vai trò làm tăng độ bền kéo của dung dịch rắn. Độ cứng lớp phủ cũng phụ thuộc vào công suất của plasma và nó tăng lên khi công suất của plasma tăng. Điều này có thể được giải thích là do sự gia nhiệt tốt, làm tan chảy từng phần của hạt. Mặt khác, lưu lượng khí tăng lên dẫn đến tăng động lượng của dòng hạt và nó ảnh hưởng tích cực đến mật độ của lớp phủ.

Trong trường hợp nghiên cứu 2 (xem các Hình 5 & 6), sự gia tăng của lưu lượng khí ảnh hưởng tích cực đến vận tốc của hạt và nhiệt độ của nó (gián tiếp thông qua Entanpy của dòng hạt). Xuất phát từ đó Entanpy của hạt giảm do thời gian bay của hạt ngắn. Để tạo ra mật độ cao và bám dính tốt trong lớp phủ, cần phải làm tăng cả vận tốc và Entanpy của hạt. Nhưng rất khó để đánh giá về mặt lý thuyết vai trò của từng thành phần này.

Trong trường hợp nghiên cứu 3 (xem Hình 7 và Hình 8), việc giảm đường kính của béc phun

dẫn đến việc tăng vận tốc hạt lên khoảng 1,5 lần, đặc biệt là khi lưu lượng khí tăng lên. Điều này có thể được giải thích bằng sự gia tăng của áp suất nhiệt động cục bộ cùng với sự gia tăng của công suất plasma và lưu lượng khí. Đồng thời tiết diện của nòng đầu phun càng hẹp thì vận tốc cục bộ càng cao do tác động của áp suất dòng chảy.

Trong trường hợp nghiên cứu 4, (xem Hình 9), phụ thuộc vào sự gia tăng của vận tốc, có sự khác biệt nhỏ về độ bám dính đối với phạm vi vận tốc nhỏ (nhỏ hơn 40 m/s), nhưng ngoài phạm vi này, độ bám dính có tốc độ giảm mạnh (trường hợp  $I = 120$  A). Giá trị này của các độ bám dính khác có độ dốc thoải hơn (trong trường hợp  $I = 240$  A). Tuy nhiên, trong trường hợp này, người ta nhận thấy rằng độ bám dính đang tiến gần đến giá trị 80 MPa, vượt quá giới hạn tối đa trong các công bố gần đây [15]. Xu hướng thứ hai trong việc thay đổi các độ bám dính là cùng với công suất plasma tăng lên, cực đại của chúng chuyển dịch theo hướng vận tốc cao hơn.

#### 5. Kết luận

1/ Đã đưa ra được một số cải tiến trong thiết kế của béc phun plasma, hoạt động dùng không khí thay vì khí trơ để phun tạo lớp phủ vô định hình nhằm tiết kiệm nguyên liệu truyền thống đắt tiền và khí hiếm.

2/ Sẽ rất hữu ích khi áp dụng kênh hào quang dài trong đầu phun plasma với đầu phun hình khuyên để ổn định tia hào quang với chế độ phun công suất lớn, tạo ra lớp phủ vô định hình có độ bám dính và mật độ cao.

3/ Dự kiến sẽ tiếp tục nghiên cứu này trong tương lai đối với lớp phủ vô định hình nếu tạo được vận tốc siêu âm, vì vận tốc ảnh hưởng song phương đến Entanpy của luồng plasma, cuối cùng là độ bám dính (tiếp cận 80 MPa) của lớp phủ.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Armelle M, Vardelle,(2007), *Thermal Spray Coatings*, chapter, Jhon Wiley & Sons,Inc DOI:10.1002/047134608X.W5293.pub2
- [2] Zulaika Abdullah, Siti Khadijah Zaaba, Mohamad Taufiq Mustaffa, Nor Aini Saidin, Johan Ariff Mohtar and Amma Zakaria, *Atmospheric Plasma Jet: Effect of Inner Diameter Size to the Length of Plasma Discharge*,(2019), *Walailak J Sci & Tech*, 16(6):391-399. DOI: <http://doi.org/10.48048/wjst.2019.4788>.
- [3] Israel Martinez- Villegas, Alma G.Mora-Garcia, Heidee Ruiz-Luna, Jhon McKelliget, Carlos A.Poblano-Salas, Juan Munoz-Saldana & Gerardo Trapaga-Martinez,(2020),*Swirling Effects in Atmospheric Plasma Spraying Process: Experiment and Simulation*, *Coatings*,10,388; doi:10.3390/coatings10040388.
- [4] Bobzin k, Oeto M, Knoch M.A & Heinemann H,(2020), *Influence of the injector head geometry on the particle injection in plasma spraying*, *Journal of Thermal Spray Technology*,29(2), 534-545(CrossRef).DOI:10.1007/s11666-020-01009-6.
- [5] Alice Dolmaire, Simon Goutier,Michel Vardelle, Pierre-Marie Geffroy, Aurelien Joulia,(2021), *Investigation on Particle Behavior at the Stagnation Zone for a Suspension Particle Jet in Plasma Spray Conditions*, *Journal of Thermal Spray Technology*, DOI:10.1007/s11666-021-01174-2.
- [6] Caliaro F.R,Miranda F.S,Reis D.A.P, FilhoG.P, Charakhovski L.I,Essiptchouk A,(2016),*Plasma torch for supersonic plasma spray at atmospheric pressure*, *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier BV, 237,351-360.
- [7] S.Liu, Y.Zhang & R.Kovacevic,(2015), *Numerical Simulation and Experimental Study of Powder Flow Distribution in High Power Direct Diode Laser Cladding Process*, *Lasers Manuf.Mater.Process*, 2,199-218, DOI 10.1007/s40516-015-0015-2.
- [8] Rene Nardi Rezende,Vladia de Castro Perez & Amilcar Pimenta,(2014), *Dimensioning a Simplex Swirl Injector*, Conference Paper, DOI :10.2514/6.2014-3602.
- [9] V.V Kudinov & G.B Bobrov, (1992),*Deposition of the Coatings. Theory, Thechnology and Equipment*,,Moscow, Publisher “Metallurgy”, ISBN 5-229-00843-1.
- [10] Sunday Temitope Oyinbo and Tien-Chien Jen,(2019), *A comparative review on cold gas dynamic spraying processes and technologies*, *Manufacturing Review*,6(25),1-20.
- [11] 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. Doi 10.1007/s00348-014-1842-1.
- [12] ASTM E 341-08 (2020) - *Standard Practice for Measuring Plasma Arc Enthalpy by Energy Balance*. DOI: 10.1520/E0341-08R20.
- [13] <https://www.pharmaceuticalonline.com/doc/cilas-1090-particle-size-analyzer-0002>.
- [14] C.YKoga, R.Schulz,S.Savoie, A.R.C.Nascimento, C.Bolfarini, C.S.Kiminami, W.J.Botta (2016), *Microstructure and wear behavior of Fe-based amorphous HVOF coatings produced from commercial precursors*. *Surface & Coating Technology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.057>.
- [15] Ville Matikainen, Heli Koivuluoto, Andrea Milanti,Petri Vuoristo, (2015), *Advanced coatings by novel high-kinetic thermal spray processes*, *Tempere University, Finland, Materia 1/2015 TIEDE & TEKNIKA*,P:46-50.