

# ẢNH HƯỞNG CỦA VẬT LIỆU PHỦ ĐIỆN CỰC WC ĐẾN CÁC CHỈ TIÊU CHẤT LƯỢNG TRONG MICRO-EDM GIA CÔNG Ti-6Al-4V

INFLUENCE OF WC ELECTRODE COATING MATERIAL ON QUALITY INDICATORS IN MICRO-EDM FOR Ti-6Al-4V

Nguyễn Hữu Phần<sup>1,\*</sup>, Hoàng Tiến Dũng<sup>1</sup>, Phạm Văn Đông<sup>1</sup>,  
Bành Tiến Long<sup>2</sup>, Trần Văn Đua<sup>1</sup>, Shailesh Shirguppikar<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2024.015>

## TÓM TẮT

Hạn chế của micro-EDM gồm năng suất gia công thấp, chất lượng bề mặt không cao và điện cực bị mòn liên tục trong suốt quá trình gia công. Sử dụng điện cực phủ trong micro-EDM là một giải pháp kỹ thuật đã và đang thu hút sự quan tâm của các chuyên gia kỹ thuật. Giải pháp này có thể mang lại hiệu quả kinh tế và kỹ thuật cao. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ khảo sát một số loại vật liệu phủ điện cực nhằm cải thiện quá trình gia công bằng micro-EDM. Các vật liệu phủ AlCrN, TiN và các bon được sử dụng để phủ lên bề mặt điện cực WC.

**Từ khóa:** AlCrN, TiN, WC, Micro-EDM.

## ABSTRACT

Limitations of micro-EDM include low machining productivity, poor surface quality, and continuous electrode wear throughout the machining process. Using coated electrodes in micro-EDM is a technical solution, it has been attracting the attention of technical experts. This technical solution can bring high economic and technical efficiency. In this study, the authors will investigate the influence of several types of electrode coating materials on MRR, TWR and OVC in micro-EDM, it aims to improve the efficiency of micro-EDM machining. AlCrN, TiN and carbon coating materials are used to coat the WC electrode surface.

**Keywords:** AlCrN, TiN, WC, Micro-EDM.

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>2</sup>Đại học Bách khoa Hà Nội

<sup>3</sup>Khoa Cơ khí, Viện Công nghệ Rajararambapu, Ấn Độ

\*Email: phanktcn@gmail.com

Ngày nhận bài: 10/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hợp kim Titan (Ti-6Al-4V) được sử dụng rất phổ biến trong các lĩnh vực như hàng không, y sinh và hạt nhân. Vật liệu này thuộc nhóm vật liệu khó gia công và EDM là phương pháp được sử dụng phổ biến để gia công nó, đặc biệt với các sản phẩm kích thước nhỏ gia công bằng micro-EDM. Trong

micro-EDM, cùng với năng suất gia công (MRR), lượng mòn điện cực (TWR) và độ chính xác gia công là các chỉ tiêu chất lượng cũng rất được quan tâm. Sử dụng điện cực phủ là giải pháp kỹ thuật mới, nó có thể cải thiện đáng kể các chỉ tiêu chất lượng trong micro-EDM. Mặc dù vậy, lựa chọn vật liệu phủ phù hợp với điện cực trong micro-EDM là rất phức tạp, bởi nó phụ thuộc vào các đặc tính của điện, nhiệt và hóa lý của vật liệu phủ được sử dụng và loại vật liệu gia công. Tuy nhiên, số lượng các nghiên cứu nhằm phân tích và đánh giá đặc tính phù hợp của lớp phủ với điều kiện làm việc trong micro-EDM là rất ít. Do đó, để có thể ứng dụng điện cực phủ trong thực tiễn, thì cần thiết phải có những nghiên cứu theo định hướng này.

Vật liệu phủ được sử dụng để tạo lớp phủ trên bề mặt điện cực trong micro-EDM, nó sẽ dẫn đến sự thay đổi quá trình hình thành tia lửa điện, khả năng chịu nhiệt và hiện tượng hóa lý trong suốt quá trình gia công bị ảnh hưởng. So với điện cực Cu, điện cực Al phủ Cu đã giúp chi phí gia công giảm bằng 35% [1]. Các kết quả nghiên cứu của công nghệ này mới chỉ ở giai đoạn đầu, bởi vậy nó cần thiết phải có những kết quả nghiên cứu đánh giá hiệu quả kinh tế của giải pháp kỹ thuật này. Lớp phủ Ag trên nền điện cực Cu trong EDM, nó đã góp phần cải thiện đồng thời MRR, TWR và nhám bề mặt gia công (SR) [2]. So với điện cực Cu, lớp phủ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> với điện cực Cu đã dẫn đến hiệu quả gia công được cải thiện đáng kể, TWR và lượng quá cắt (OVC) được giảm lần lượt xấp xỉ 92% và 62,5% [3]. Cu và Ag được sử dụng là các vật liệu phủ vào lớp bề mặt điện cực WC trong micro-EDM [4]. Kết quả cho thấy rằng, MRR của điện cực phủ Cu là lớn nhất, và nhỏ nhất với điện cực không phủ. TWR của điện cực không phủ là nhỏ nhất. Các kết quả của nghiên cứu khảo sát trong micro-EDM với điện cực phủ Cu-ZrB<sub>2</sub> đã cho thấy rằng, độ bề mòn của điện cực phủ được tăng đáng kể so với nó của điện cực không phủ [5]. Lớp vật liệu phủ Cu-MWCNT đã góp phần cải thiện đồng thời MRR, TWR, độ ứng tế vi bề mặt gia công (HV) và topography của bề mặt gia công trong EDM [6]. Một lượng của vật liệu phủ Cu, MWCNT và các bon

đã xâm nhập vào bề mặt gia công và điều này sẽ làm thay đổi cơ lý hóa tính của lớp bề mặt gia công. Chất lượng bề mặt sau EDM với điện cực Gr mạ đồng cũng tương tự như với điện cực Cu, SR của điện cực Gr mạ đồng và điện cực Cu lần lượt bằng 0,191 $\mu$ m và 0,197 $\mu$ m [7]. Điều này cho thấy EDM sử dụng điện cực mạ vật liệu phù hợp có thể là giải pháp kỹ thuật ứng dụng tốt cho gia công tinh. Vật liệu của lớp phủ đã xuất hiện trên bề mặt phôi Ti-6Al-4V sau EDM sử dụng điện cực phủ AlCrNi [8]. Sự xuất hiện của Cr và Ni trên lớp bề mặt gia công, chúng có thể cải thiện đáng kể khả năng làm việc của bề mặt gia công sau EDM với điện cực phủ. Vật liệu lớp phủ của điện cực là khác nhau, chúng sẽ ảnh hưởng đến khả năng làm việc của điện cực là khác nhau [9]. Nguyên nhân có thể là do đặc trưng của nhiệt độ nóng chảy, sự dẫn điện và dẫn nhiệt của chúng là khác nhau. Lớp phủ TiN đã giúp TWR và OVC trong micro-EDM sử dụng điện cực WC giảm lần lượt bằng 16,32% và 26% [10]. Ngoài ra, chiều sâu gia công của micro-EDM với điện cực WC phủ TiN được cải thiện xấp xỉ 18,9%. Sử dụng vật liệu phủ TiN trên bề mặt điện cực sẽ mang lại hiệu quả gia công cao hơn so với lớp phủ TiAlN và điện cực Cu [11]. Ngoài ra, sự ảnh hưởng của U, I và T<sub>on</sub> đến các chỉ tiêu chất lượng trong EDM với điện cực phủ cũng được xác định. Điện cực Cu phủ ZnCr có thể mang lại hiệu quả gia công cao hơn so với điện cực Cu trong EDM khi gia công hợp kim IN718 [12]. Lớp phủ trên bề mặt của phôi được tạo thành bằng EDM là tốt, độ cứng của lớp phủ được tăng đáng kể và chiều dày của lớp phủ là khá lớn (11 - 16 $\mu$ m) [13]. So sánh khả năng phủ hợp của các vật liệu phủ điện cực TiN, Ag và ZrN trong micro-EDM đã cho thấy điện cực phủ TiN là phù hợp nhất [14]. EWR và OC của điện cực phủ TiN là nhỏ nhất và lớn nhất với điện cực phủ Ag. Đặc trưng của lớp phủ trên bề mặt điện cực có ảnh hưởng đáng kể đến topography của bề mặt gia công sau EDM [15]. Kích thước của các vết lõm trên bề mặt gia công bị ảnh hưởng đáng kể bởi kích thước cỡ hạt của vật liệu lớp phủ [16]. Sử dụng điện cực Al phủ Cu trong EDM khi gia công thép 38X2H2MA sẽ tạo thuận lợi cho việc giảm giá thành vật liệu điện cực và hiệu quả kỹ thuật vẫn đảm bảo tốt [17]. Sử dụng kỹ thuật điện cực phủ trong EDM sẽ góp phần làm giảm trọng lượng của điện cực so với điện cực không phủ, lượng giảm của khối lượng của điện cực phủ bằng xấp xỉ 3,2 lần [18]. So với điện cực không phủ, điện cực nền trước khi phủ được sản xuất bằng công nghệ in 3D và điều này giúp cho quá trình chế tạo điện cực với bề mặt phức tạp là dễ dàng hơn với giá thành chế tạo rẻ hơn. Sự hiệu quả của ứng dụng của EDM với điện cực phủ trong thực tiễn cần tiếp tục được làm sáng tỏ [19].

Các nghiên cứu đã được công bố đã cho thấy rằng, sử dụng điện cực phủ trong micro-EDM là rất khả thi, tuy nhiên các kết quả nghiên cứu theo định hướng này còn rất ít. Các kết quả chủ yếu là nghiên cứu khảo sát và đặc trưng ảnh hưởng của vật liệu lớp phủ trong lĩnh vực này chưa được làm rõ. Các nghiên cứu nhằm đánh giá sự hợp lý của micro-EDM sử dụng điện cực phủ cần tiếp tục được thực hiện. Trong nghiên cứu này, sự ảnh hưởng của vật liệu phủ trên bề mặt điện cực WC trong micro-EDM for Ti-6Al-4V đến Z, TWR và

OC đã được thực hiện. Và chất lượng bề mặt sau micro-EDM với điện cực phủ và điện cực không phủ cũng được phân tích và đánh giá.

## 2. ĐIỀU KIỆN THỰC NGHIỆM

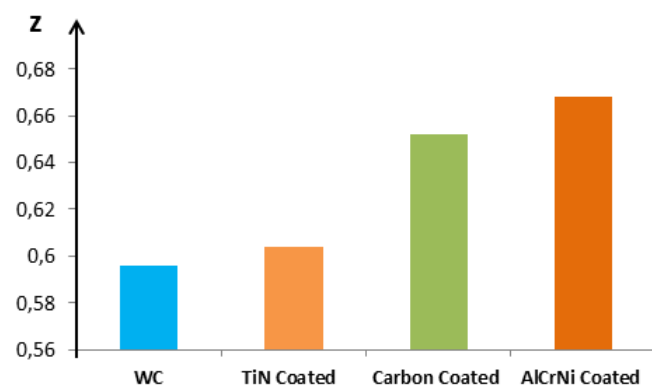
Máy micro-EDM được sử dụng trong nghiên cứu thực nghiệm là Hyper 10 micro-EDM (Synergy Nano Systems Model: Hyper 10). Dung dịch điện môi là dầu EDM, và vật liệu phôi là hợp kim titan (Ti-6Al-4V). Điện cực WC có đường kính trung bình 490 $\mu$ m được sử dụng. Các thí nghiệm được thực hiện bằng 4 loại điện cực khác nhau trên tấm Ti-6Al-4V dày 1,6mm. Các loại điện cực gồm: điện cực WC; điện cực WC được phủ một lớp TiN dày 6,663 $\mu$ m và đường kính trung bình là 503,326 $\mu$ m; Điện cực WC phủ Carbon lên đến 10 $\mu$ m được sử dụng; Điện cực WC phủ AlCrN dày 3,385 $\mu$ m phủ trên và đường kính trung bình là 496,77 $\mu$ m. Phương pháp bay hơi lắng đọng hóa học (CVD) được sử dụng để thực hiện quá trình phủ các vật liệu trên bề mặt điện cực. Khối lượng của tất cả các điện cực dụng cụ được đo trước và sau mỗi thí nghiệm trên cân phân tích chính xác (Ishida Co. Ltd., Model-DXR220). Điện cực phân cực thuận. Các kết quả thử nghiệm về tốc độ mài mòn của điện cực, lượng quá cắt (OVC) và chiều sâu cắt (Z) theo sự thay đổi của điện cực phủ được diễn tả như tại bảng 1.

Bảng 1. Điều kiện thực nghiệm

Điện cực WC	Thông số công nghệ	Thời gian gia công/thí nghiệm (phút)	Chỉ tiêu chất lượng trong micro-EDM		
			Z (mm)	TWR (mg/phút)	Overcut ( $\mu$ m)
Không phủ	V = 120V; C = 100pF; RPM = 200 v/phút	15	0,596	0,0134	102,575
Phủ TiN			0,604	0,0083	60,263
Phủ các bon			0,652	0,0097	60,079
Phủ AlCrNi			0,667	0,0072	58,379

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Sự ảnh hưởng của vật liệu phủ điện cực đến chiều sâu cắt (Z)



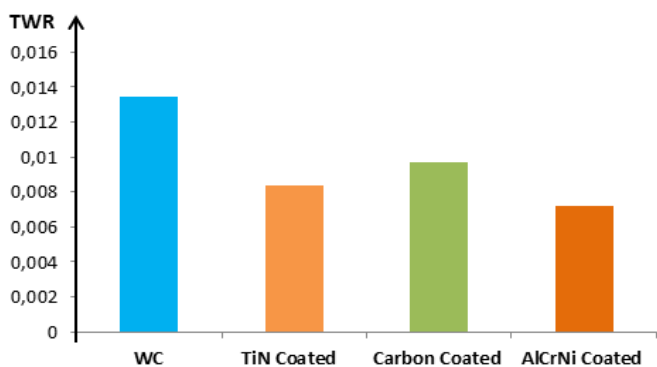
Hình 1. Sự ảnh hưởng của vật liệu lớp phủ đến Z

Hình 1 cho thấy các vật liệu phủ có ảnh hưởng đáng kể đến năng suất gia công, bởi chiều sâu cắt (Z) đều tăng một lượng đáng kể với các chế độ công nghệ được khảo sát. Và

vật liệu phủ khác nhau sẽ có ảnh hưởng khác nhau đến Z. Các vật liệu phủ sử dụng trong nghiên cứu này đều có khả năng cải thiện đáng kể giá trị của Z. Kết quả của Z tại các điều kiện thực nghiệm khảo sát khác nhau đều chỉ ra rằng, lớp vật liệu phủ AlCrN sẽ cho Z là lớn nhất, tiếp theo là vật liệu phủ các bon và vật liệu phủ TiN. Hình 1 đã cho thấy: So với Z của điện cực WC không phủ, Z của điện cực phủ TiN tăng 1,34%, Z của điện cực phủ các bon tăng 9,41% và Z của điện cực phủ AlCrN tăng 12,05%.

**3.2. Sự ảnh hưởng của vật liệu phủ điện cực đến TWR**

Sự ảnh hưởng của vật liệu phủ đến tuổi bền mòn của điện cực WC trong micro-EDM được trình bày trên hình 2. Hình 2 cho thấy lượng mòn của các điện cực bị tăng dần trong các điều kiện công nghệ được khảo sát, TWR của điện cực phủ AlCrN là nhỏ nhất và nó bị tăng dần với các điện cực phủ TiN và điện cực phủ các bon. Điều này cho thấy, vật liệu phủ AlCrN có cải thiện độ bền mòn điện cực WC là cao nhất và vật liệu phủ các bon có khả năng cải thiện độ bền mòn điện cực WC thấp nhất. Kết quả cho thấy rằng TWR của điện cực phủ sẽ bị thay đổi khác nhau so với điện cực không phủ. TWR của điện cực phủ tại hình 2 nhỏ hơn đáng kể so với so với nó của điện cực WC. So với TWR của điện cực WC không phủ tại hình 2, TWR của điện cực WC phủ AlCrN được giảm 46,19%, TWR của điện cực phủ TiN giảm 37,76% và của điện cực phủ các bon giảm 27,46%. Như vậy, lớp vật liệu phủ các bon trong micro-EDM gia công hợp kim titan tại điều kiện thực nghiệm khảo sát này là không mang lại hiệu quả đối với sự cải thiện TWR, do đó sử dụng điện cực phủ các bon trong nghiên cứu khảo sát này là không hợp lý. Kết quả đã chỉ ra rằng việc nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến TWR của điện cực phủ là cần thiết, bởi điều này sẽ mang lại sự hiệu quả của lớp phủ trong việc cải thiện độ bền mòn của điện cực trong micro-EDM và góp phần đáng kể trong việc nâng cao độ chính xác gia công.

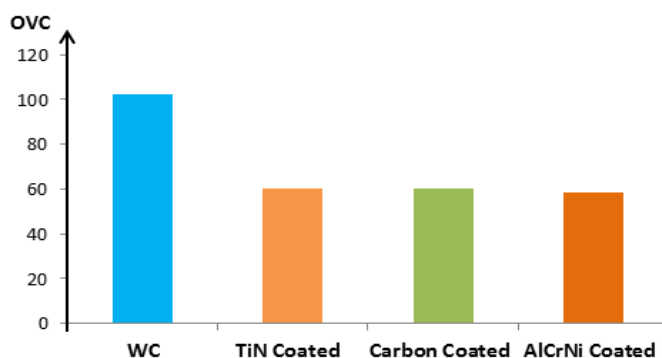


Hình 2. Sự ảnh hưởng của vật liệu lớp phủ đến TWR

**3.3. Sự ảnh hưởng của vật liệu phủ điện cực đến lượng quá cắt (OVC)**

Giá trị của OVC trong micro-EDM có ảnh hưởng trực tiếp đến kích thước gia công và OVC càng tăng thì kích thước khe hở giữa điện cực và bề mặt gia công cũng tăng theo. Bởi vậy, độ lớn và sự thay đổi của OVC càng lớn sẽ dẫn đến độ chính xác gia công càng giảm. Sự ảnh hưởng của lớp vật liệu phủ đến OVC trong micro-EDM trong các điều kiện thực

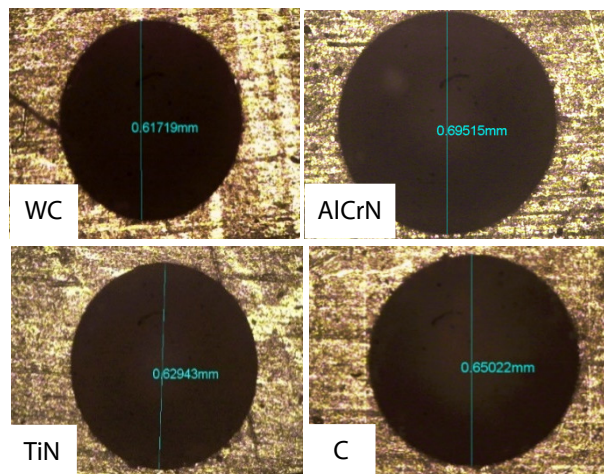
thực nghiệm khảo sát khác nhau được trình bày trên hình 3. So với OVC với điện cực không phủ tại hình 3, OVC với điện cực phủ AlCrN bị giảm 43,09%, với TiN bị giảm 41,25% và với điện cực phủ các bon bị giảm 41,43%.



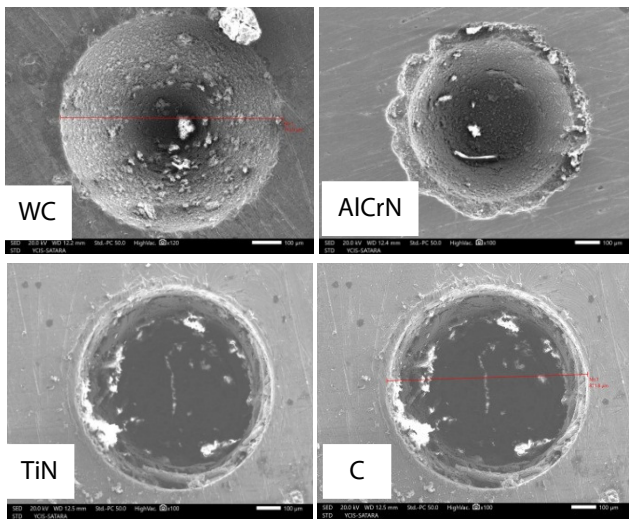
Hình 3. Sự ảnh hưởng của vật liệu lớp phủ đến OVC

**3.4. Phân tích chất lượng gia công sau micro-EDM**

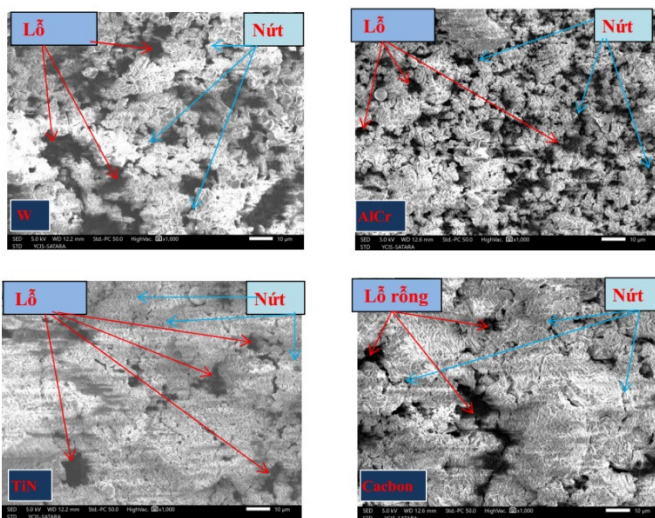
Phân tích chất lượng gia công sau micro-EDM với điện cực phủ và không phủ được trình bày trên hình 4. Kích thước và hình dạng đại quang của lỗ gia công sau micro-EDM cho thấy kết quả là khá tốt. Kết quả SEM của lỗ gia công sau micro-EDM đã cho thấy hạt vụn bám dính rất nhiều trên bề mặt của lỗ, mật độ của các hạt vụn lớn dần về phía đáy của lỗ gia công (hình 5). Số lượng hạt vụn bám dính bề mặt gia công với điện cực không phủ sẽ là lớn nhất, và nó là nhỏ nhất với điện cực phủ carbon. Ngoài ra, SEM của hình dạng của các lỗ sau micro-EDM đã cho thấy rằng chúng bị sai lệch là khá đáng kể. Topography của bề mặt gia công sau micro-EDM bao gồm nhiều lỗ rỗng và nứt tế vi (hình 6). Điều này sẽ ảnh hưởng rất đáng kể đến khả năng làm việc của bề mặt gia công. EDX của bề mặt gia công trong micro-EDM với điện cực phủ và không phủ đã cho thấy rằng vật liệu của lớp bề mặt điện cực đã xuất hiện trên bề mặt gia công (hình 7). Nguyên tố W đã chỉ xuất hiện trên bề mặt gia công tại hình 7a, và các nguyên tố hợp kim của vật liệu phủ xuất hiện trên bề mặt gia công tại hình 7b, c và d. Điều này cho thấy rằng, điện cực nền của điện cực phủ đã được bảo vệ trong suốt quá trình gia công, và lớp phủ đã góp phần cải thiện được điều kiện làm việc của điện cực trong micro-EDM.



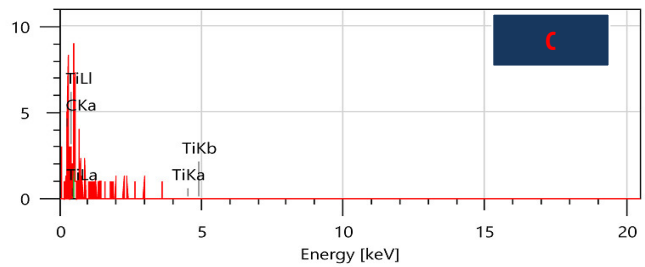
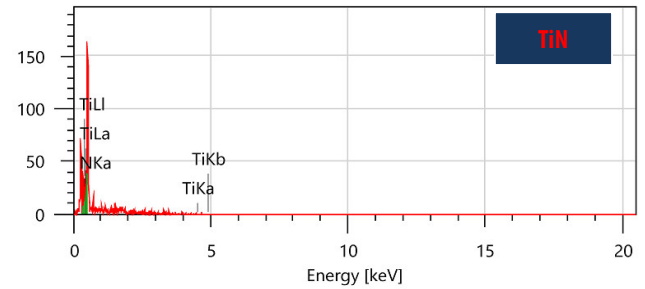
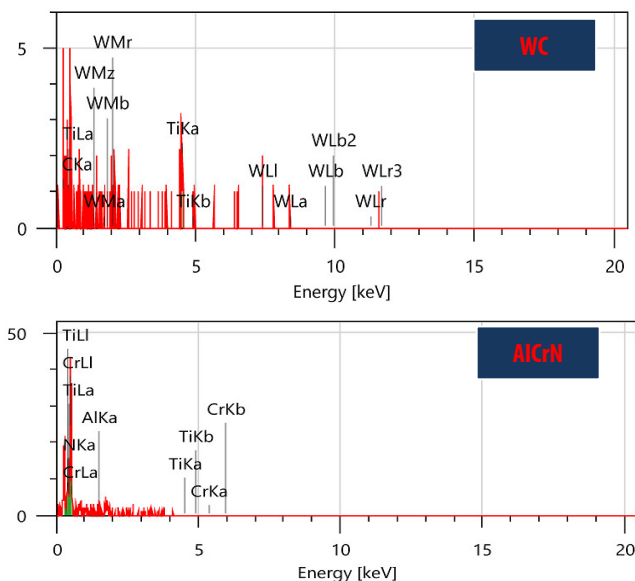
Hình 4. Kích thước gia công trong micro-EDM



Hình 5. SEM của bề mặt lỗ trong micro-EDM



Hình 6. Topography của bề mặt gia công sau micro-EDM (V = 120; C = 100pF và RPM = 200 v/phút)



Hình 7. EDX bề mặt gia công sau micro-EDM (V = 120; C = 100pF và RPM = 200 v/phút)

**4. KẾT LUẬN**

Nghiên cứu khảo sát các chỉ tiêu chất lượng trong micro-EDM với điện cực phủ và không phủ để gia công hợp kim titan (Ti-6Al-4V) đã được thực hiện. Trên cơ sở kết quả nghiên cứu, chúng tôi đã đưa ra được một số kết luận sau:

- Vật liệu phủ của bề mặt điện cực (TiN, AlCrN và C) đã giúp Z được tăng đáng kể, và điều này đã góp phần dẫn đến năng suất gia công trong micro-EDM với điện cực phủ được cải thiện đáng kể.

- Ảnh hưởng của vật liệu điện cực đến OVC và TWR là khá tương đồng. Sự cải thiện của TWR và OVC phụ thuộc vào mức của thông số công nghệ trong micro-EDM được lựa chọn trong nghiên cứu.

- Chất lượng bề mặt gia công và độ chính xác hình dạng phôi trong micro-EDM bị ảnh hưởng đáng kể bởi các kiểu điện cực và điều kiện gia công bị thay đổi. Ngoài ra, các hạt bám dính có xu hướng xuất hiện nhiều hơn về khu vực đáy của bề mặt lỗ gia công trong micro-EDM.

- Sự ảnh hưởng của vật liệu phủ đến các chỉ tiêu chất lượng trong micro-EDM bị phụ thuộc rất nhiều vào các thông số công nghệ điều khiển. Bởi vậy, nó là cần thiết phải có những nghiên cứu xác định thông số công nghệ tối ưu (hợp lý) trong micro-EDM với điện cực phủ.

- Các nghiên cứu tiếp theo cũng cần tập trung quan tâm đến việc phân tích chiều dày và tuổi bền của lớp vật liệu phủ đến khả năng làm việc của điện cực phủ và sự cải thiện cơ lý tính lớp bề mặt gia công thông qua sự xâm nhập của vật liệu phủ vào lớp bề mặt sau micro-EDM với điện cực phủ.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. Ablyaz T, Muratov K, Preetkanwal SB, Sarabjeet SS, "Experimental investigation of wear resistance of copper coated electrode-tool during electrical

discharge machining," *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 510: 012001, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/510/1/012001>.

[2]. K. Karunakaran, M. Chandrasekaran, "Investigation of Machine-ability of Inconel 800 in EDM with Coated Electrode," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 183, 012014, 2017. doi:10.1088/1757-899X/183/1/012014

[3]. J. Prasanna, S. Rajamanickam, "Investigation of Die Sinking Electrical Discharge Machining of Ti-6Al-4V Using Copper and AlO-TiO Coated Copper Electrode," *Middle-East Journal of Scientific Research* 24 (S1): 33-37, 2016. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2016.24.S1.8.

[4]. Yuangang W, Fuling Z, Jin W, "Wear-resist Electrodes for Micro-EDM," *Chinese J Aeronaut* 22: 339-342, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(08\)60108-9](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(08)60108-9)

[5]. Mandal P, Mondal SC, "Performance analysis of copper-based MWCNT composite coated 316L SS tool in electro discharge machining," *Mach Sci Technol* 25: 422-437, 2021. <https://doi.org/10.1080/10910344.2020.1855652>

[6]. Nattawut Chindaladdha, Don Kaewdook, "Performance of Electroplated Copper Coating on Graphite Electrode in EDM Process," *TNI Journal of Engineering and Technology*, Vol.8 No.1, 2020.

[7]. Yu Liu, Wenjian Wang, Wenchao Zhang, Fujian Ma, Dapeng Yang, Zhihua Sha, Shengfang Zhang, "Experimental Study on ElectrodeWear of Diamond-NickelCoated Electrode in EDM Small Hole Machining," *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2019, ID 7181237. <https://doi.org/10.1155/2019/7181237>.

[8]. George J, Chandan R, Manu R, Mathew J, "Experimental Investigation of Silicon Powder Mixed EDM Using Graphene and CNT Nano Particle Coated Electrodes," *Silicon* 13: 3835-3851, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00658-0>

[9]. Shailesh S. Shirguppikar, Maharudra S. Patil, "Experimental investigation on micro-electro discharge machining process using tungsten carbide and titanium nitride-coated micro-tool electrode for machining of Ti-6Al-4V," *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2020. DOI: 10.1080/2374068X.2020.1833399

[10]. D. L. Panchal, S. K. Biradar, V. Y. Gosavi, "Analysis of EDM Process Parameters by Using Coated Electrodes," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* - Vol. 41(4), 2016.

[11]. Reolon L.W., Henning Laurindo C.A., Torres R.D., et al., "WEDM performance and surface integrity of Inconel alloy IN718 with coated and uncoated wires," *Int J Adv Manuf Technol* 100, 1981-1991, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2828-6>

[12]. Anshuman Kumar Sahu, Siba Sankar Mahapatra, Suman Chatterjee, "Optimization of electrical discharge coating process using MOORA based firefly algorithm," *Proceedings of the ASME 2017 Gas Turbine India Conference*, Bangalore, India, 2017.

[13]. Hsu HY., Hu CC., "Surface quality improvement of EDMed Ti-6Al-4V alloy using plasma etching and TiN coating," *Int J Adv Manuf Technol* 88, 67-74, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8760-8>

[14]. Uhlmann E, Rosiwal S, Bayerlein K, Röhner M, "Influence of grain size on the wear behavior of CVD diamond coatings in micro-EDM," *Int J Adv Manuf Technol* 7:919-922, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2131-7>

[15]. Subrat Kumar Baral, Pooja Pallavi, Asha Utkarshaa, "Effect of nichroloy coated electrode on machining performance of electrical discharge machining using Inconel 625," *Materials Today: Proceedings* 45, 7894-7900, 2021.

[16]. Liew PJ, Yap CY, Wang J, Zhou T, Yan J, "Surface modification and functionalization by electrical discharge coating: a comprehensive review," *Int J Extrem Manuf* 2: 012004, 2020. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab7332>.

[17]. Ablyaz TR, Shlykov ES, Kremlev SS, "Copper-Coated Electrodes for Electrical Discharge Machining of 38X2H2MA Steel," *Russ Engin Res* 37: 910-911, 2017. <https://doi.org/10.3103/S1068798X17100033>

[18]. Danade UA, Londhe SD, Metkar RM, "Machining performance of 3D-printed ABS electrode coated with copper in EDM," *Rapid Prototyp J* 25: 1224-1231, 2019. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2018-0297>

[19]. Phan NH, Dong PV, Mthuramalingam T, Thien NV, Dung HT, Hung TQ, Duc NV, Ly NT, "Experimental Investigation of Uncoated Electrode and PVD AlCrNi Coating on Surface Roughness in Electrical Discharge Machining of Ti-6Al-4V," *Int J Eng, Transactions A: Basics* 34: 928-934, 2021. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.04a.19>

#### AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Huu Phan<sup>1</sup>, Hoang Tien Dzung<sup>1</sup>, Pham Van Dong<sup>1</sup>, Banh Tien Long<sup>2</sup>, Tran Van Dua<sup>1</sup>, Shailesh Shirguppikar<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Hanoi University of Industry, Vietnam

<sup>2</sup>University of Science and Technology, Vietnam

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Rajarambapu Institute of Technology, India