

KHẢO SÁT KẾT QUẢ GIA CÔNG EDM TRÊN ĐIỆN CỰC ĐỒNG ĐỎ VÀ THAN CHÌ ĐỐI VỚI THÉP P20

INVESTIGATION OF GRAPHITE AND COPPER ELECTRODES ON EDM MACHINING OF P20 STEEL

Đặng Xuân Phương^{1,*},
Vũ Ngọc Chiên¹, Nguyễn Thị Liễu²

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2024.010>

TÓM TẮT

Nghiên cứu này khảo sát năng suất bóc tách vật liệu và độ nhám bề mặt chi tiết gia công bằng phương pháp gia công tia lửa điện (EDM) đối với thép làm khuôn P20 bằng hai loại điện cực thông dụng là đồng đỏ và than chì. Phương pháp thực nghiệm Box-Behnken và phương trình hồi quy bậc 2 được sử dụng để biểu diễn mối quan hệ thống kê toán học giữa các thông số công nghệ gia công EDM và các thông số kết quả đầu ra (năng suất bóc tách vật liệu và độ nhám bề mặt gia công). Kết quả thực nghiệm và xử lý số liệu cho thấy cường độ điện gia công càng lớn thì năng suất gia công càng lớn, tuy nhiên độ nhám bề mặt chi tiết gia công càng cao. Điện cực đồng đỏ có năng suất bóc tách vật liệu cao hơn 16,4% và độ nhám bề mặt gia công thấp hơn 11,2% so với điện cực than chì. Nghiên cứu này làm cơ sở để lựa chọn vật liệu làm điện cực trong gia công EDM.

Từ khóa: Điện cực đồng đỏ; điện cực than chì; EDM; gia công tia lửa điện; năng suất gia công.

ABSTRACT

This study investigates the material removal and surface roughness of P20 steel by electric discharge machining (EDM) between two common electrodes: copper and graphite. The Box-Behnken experimental method and the quadratic regression equations are used to represent the mathematical-statistical relationship between the EDM machining parameters and machining performances (material removal rate and surface roughness). Experimental results and data processing show that the higher the machining current, the higher the material removal rate, but the higher the surface roughness of the workpiece. The copper electrode has 16.4% higher material removal rate and 11.2% lower machined surface roughness than the graphite electrode. This study serves as a database for selecting electrode materials in EDM machining.

Keywords: Copper electrode; graphite electrode; EDM; electric discharge machining; machining productivity.

¹Trường Đại học Nha Trang

²Trường Đại học Sao Đỏ

*Email: phuongdx@ntu.edu.vn

Ngày nhận bài: 22/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gia công tia lửa điện (Electric Discharge Machining-EDM) là một phương pháp gia công phi truyền thống đang được sử

dụng rất phổ biến trong gia công khuôn mẫu và các vật liệu dẫn điện có độ cứng cao. Vật liệu được bóc tách khỏi chi tiết gia công bằng sự phóng điện theo chu kỳ có tần số cao giữa điện cực dụng cụ và điện cực còn lại là chi tiết gia công trong môi trường chất lỏng điện môi. Đối với phương pháp gia công EDM điện cực định hình (điện cực thối), vật liệu làm điện cực phổ biến là đồng đỏ và than chì bởi vì chúng mềm và dễ gia công hơn so với các loại vật liệu làm điện cực khác như wolfram, molybden, hợp kim cứng hoặc thép. Đồng đỏ có cơ tính tốt nhưng nặng và giá thành trên một đơn vị thể tích lớn hơn nhiều so với than chì. Với các điện cực có hình dáng phức tạp, thời gian gia công điện cực than chì nhanh hơn so với điện cực đồng đỏ. Đối với gia công EDM, năng suất gia công và chất lượng bề mặt chi tiết gia công không những phụ thuộc vào các thông số công nghệ mà còn phụ thuộc vào vật liệu làm điện cực. Chính vì vậy, khảo sát kết quả gia công EDM với hai loại điện cực nói trên sẽ mang lại dẫn liệu khoa học để đánh giá khả năng gia công của từng loại điện cực. Đồng thời giúp người gia công lựa chọn vật liệu điện cực phù hợp thỏa mãn cả tính kinh tế và kỹ thuật khi gia công EDM.

Ảnh hưởng của vật liệu than chì (graphit) làm điện cực đến chất lượng bề mặt gia công phôi thép trên máy EDM đã được Younis và cộng sự nghiên cứu [1]. Kết quả nghiên cứu cho thấy cùng là vật liệu điện cực graphit nhưng nếu tính chất vật lý và kích thước hạt khác nhau sẽ cho kết quả gia công khác nhau. Trong nghiên cứu của Gopalakannan [2], ảnh hưởng của ba loại điện cực bao gồm đồng đỏ, hợp kim đồng và vonfram, graphit đến năng suất bóc tách vật liệu, độ mòn điện cực và độ nhám bề mặt gia công của phôi thép không gỉ 17-4 PH được khảo sát. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng năng suất bóc tách vật liệu đạt giá trị cao đối với đồng đỏ; trong khi đó với vật liệu điện cực là hợp kim đồng - vonfram, tỷ lệ mòn điện cực là bé nhất, bề mặt gia công ít nhám hơn và độ chính xác kích thước tốt nhất. Điện cực graphit có năng suất bóc tách vật liệu thấp hơn đồng đỏ nhưng cao hơn kim đồng - vonfram. Tương tự, Selvarajan và cộng sự [3] tiến hành khảo sát kết quả gia công EDM của thép SS316 với hai loại điện cực là đồng đỏ và than chì. Tuy nhiên, kết quả của nghiên cứu cho thấy điện cực than chì tốt hơn so với điện cực đồng đỏ. Sonker và cộng sự [4] so sánh kết quả gia công thép làm khuôn HCHCR-D3 đối với điện cực than chì và đồng đỏ. Kết quả chỉ ra rằng, với cùng một thông số công nghệ gia công, điện cực than chì có năng suất bóc kim

loại cao hơn nhưng độ nhám bề mặt gia công thô hơn. Trong khi đó, nghiên cứu của Amorim và Weingaertner [5] kết luận rằng năng suất bóc vật liệu của điện cực than chì tương tự như đối với điện cực đồng đỏ khi gia công thép P20. Như vậy, có thể thấy rằng năng suất gia công EDM phụ thuộc vào vật liệu gia công, vật liệu làm điện cực cũng như các thông số công nghệ gia công. Chẳng hạn như trường hợp cùng là điện cực than chì, nếu chính chất vật lý, kích thước hạt hoặc phẩm cấp của than chì khác nhau, năng suất bóc tách vật liệu gia công và độ mòn điện cực cũng khác nhau [6]. Vì những lý do nói trên, nghiên cứu này khảo sát năng suất bóc tách vật liệu và độ nhám bề mặt chi tiết gia công của thép P20 với hai loại điện cực đồng đỏ và than chì thông dụng có thể dễ dàng mua được ở thị trường Việt Nam để có thêm những cơ sở dữ liệu thực nghiệm về gia công EDM trên thép P20.

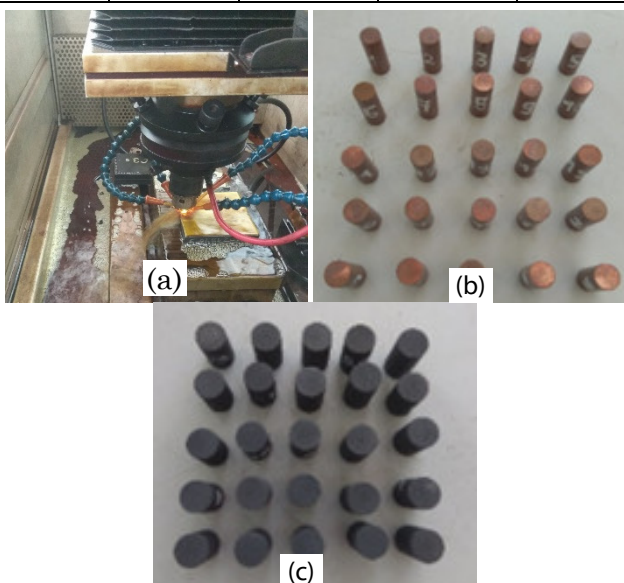
2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu, thiết bị gia công và dụng cụ đo

Nghiên cứu này sử dụng máy CNC điện cực định hình TOPEMD X600 (hình 1a). Vật liệu được gia công là thép P20 (tiêu chuẩn AISI) hoặc 2311 (theo tiêu chuẩn DIN). Đây là loại thép có độ cứng và độ thấm tôi lớn, dễ dàng đánh bóng nên thường được sử dụng khuôn đúc áp lực hoặc khuôn nhựa cao cấp nhờ có khả năng gia công tia lửa điện và gia công cơ tốt. Phôi thép dạng tấm có kích thước 16x105x115 mm và được mài nhẵn hai mặt. Vật liệu điện cực bao gồm đồng đỏ và than chì (hình 1b và 1c). Các thông số vật lý cơ bản của điện cực được trình bày ở bảng 1. Điện cực có dạng hình trụ đường kính 10 mm, được đánh số và mài nhẵn ở phía đầu gia công như hình 1b và 1c.

Bảng 1. Các thông số vật lý của điện cực

Vật liệu điện cực	Kích thước hạt trung bình (μm)	Điện trở suất (μΩm)	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Nhiệt độ nóng chảy (°C)
Đồng đỏ	-	1,68.10 ⁻⁵	8,96	1085
Than chì	12	11	1,85	3600



Hình 1. Máy EMD (a) và các loại điện cực đồng đỏ (b) và than chì (c)



Hình 2. Máy đo độ nhám (a) và máy chụp ảnh macro (b)

Độ nhám bề mặt chi tiết sau khi gia công được đo bằng máy đo độ nhám Mitutoyo SJ310 (hình 2a). Ngoài đo độ nhám bề mặt (đánh giá bằng R_a), máy chụp ảnh macro cũng được sử dụng để quan sát định tính độ nhám bề mặt sau khi gia công (hình 2b).

Năng suất bóc tách vật liệu được tính bằng thể tích gia công của điện cực trên một đơn vị thời gian (mm³/ph). Thời gian gia công của một thí nghiệm được tính bằng timer trên máy TOPEMD X600.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Để so sánh kết quả gia công EDM trên vật liệu P20 với điện cực đồng đỏ và điện cực than chì, nghiên cứu này sử dụng kết hợp các phương pháp bao gồm nghiên cứu lý thuyết để xác định bản chất và các thông số chính của quá trình gia công EDM. Sau đó, quy hoạch thực nghiệm được tiến hành để đảm bảo số lượng thí nghiệm là tối ưu và các thí nghiệm phủ đều miễn thiết kế thí nghiệm. Cuối cùng, phương pháp hồi quy trong thống kê được sử dụng để tìm mối quan hệ toán học giữa các thông số công nghệ đầu vào và các thông số kết quả gia công để có thể dự đoán được kết quả gia công khi biết các thông số công nghệ gia công. Ngoài ra, phép kiểm định T-test được sử dụng để đánh giá sự khác biệt về giá trị trung bình của tổng thể từ đó so sánh được năng suất gia công và độ nhám bề mặt của hai loại điện cực đồng đỏ và than chì.

Thông qua nghiên cứu tài liệu và kinh nghiệm thực tiễn gia công, các thông số chính ảnh hưởng quyết định đến quá trình gia công EDM được trình bày ở bảng 2. Giá trị mức min,

max của các biến số được lựa chọn dựa trên giải các giá trị của các thông số gia công do nhà sản xuất máy công cụ EDM cung cấp. Dòng điện đi qua điện cực được chia thành 20 mức từ 1 đến 20 (tương đương với 0,5 đến 75 Ampe). Tuy nhiên theo kinh nghiệm gia công, mức dòng điện được lấy từ mức 4 đến 10 (nếu mức dòng điện lớn sẽ gây cháy điện cực). Điện áp từ 50V đến 70V, thời gian mở xung từ 2 đến 8, thời gian tắt xung từ 4 đến 12. Các thông số gia công khác được cố định ở toàn bộ các thí nghiệm của nghiên cứu này.

Bảng 2. Các thông số công nghệ (biến số) gia công EDM

STT	Biến số	Các mức thí nghiệm		
		Mức min	Mức giữa	Mức max
1	Đòng điện (I)	4	7	10
2	Điện áp (V)	50	60	70
3	Thời mở xung (Ton)	2	5	8
4	Thời gian tắt xung (Toff)	4	8	12

Để số thí nghiệm là ít nhất và dữ liệu cần thiết thu được là nhiều nhất, phương pháp quy hoạch thực nghiệm cần phải được áp dụng. Trong nghiên cứu này, phương pháp Box-Behnken được sử dụng. Đây là phương pháp thuộc nhóm quy hoạch thực nghiệm không toàn phần mà mỗi biến số có 3 mức. Các thí nghiệm trong phương pháp Box-Behnken được lấy từ các khối (block) của phương pháp quy hoạch thực nghiệm ma trận trực giao. Với sự hỗ trợ của phần mềm iSight, số thí nghiệm cần phải thực hiện cho 4 biến số và mỗi biến có 3 mức (các thông số gia công ở bảng 2) là 25 thí nghiệm.

Để xây dựng mối quan hệ giữa các thông số công nghệ gia công và kết quả gia công, nghiên cứu này áp dụng mô hình hồi quy bậc 2 có dạng:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

trong đó, k là số biến số, ε là sai số của mô hình hồi quy và β_i, β_{ii} và β_{ij} là các hệ số của phương trình hồi quy.

Mô hình bậc 2 cho phép biểu diễn được mối quan hệ phi tuyến giữa các thông số công nghệ gia công và các thông số đầu ra. Độ chính xác của mô hình hồi quy được đánh giá bằng hệ số xác định R-squared.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (2)$$

Trong đó, y_i, \bar{y}_i và \hat{y}_i lần lượt là giá trị, giá trị trung bình và giá trị ước lượng (xấp xỉ).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình hồi quy biểu diễn mối quan hệ giữa các thông số công nghệ gia công và các thông số kết quả gia công

Kết quả thí nghiệm với điện cực đồng đỏ và than chì được trình bày tại bảng 3. Từ số liệu thu được, các phương trình

hồi quy được xây dựng nhờ sự hỗ trợ của phần mềm iSight như sau:

- Đối với điện cực đồng đỏ:

$$y_1 = 5,3 - 7,6952x_1 - 0,1270x_2 - 1,1338x_3 + 0,5772x_4 + 1,5010x_1^2 - 0,0429x_2^2 + 0,1116x_3^2 - 0,0033x_4^2 - 0,2566x_1x_2 - 0,0014x_1x_3 - 0,0842x_1x_4 + 0,04x_2x_3 + 0,0306x_2x_4 - 0,0058x_3x_4 \quad (3)$$

$$y_2 = 17,76 + 0,0126x_1 - 0,3875x_2 + 1,1531x_3 - 0,5393x_4 + 0,0341x_1^2 + 0,0007x_2^2 + 0,017x_3^2 - 0,003x_4^2 - 0,020x_1x_2 - 0,083x_1x_3 + 0,013x_1x_4 + 0,008x_2x_3 + 0,011x_2x_4 - 0,008x_3x_4 \quad (4)$$

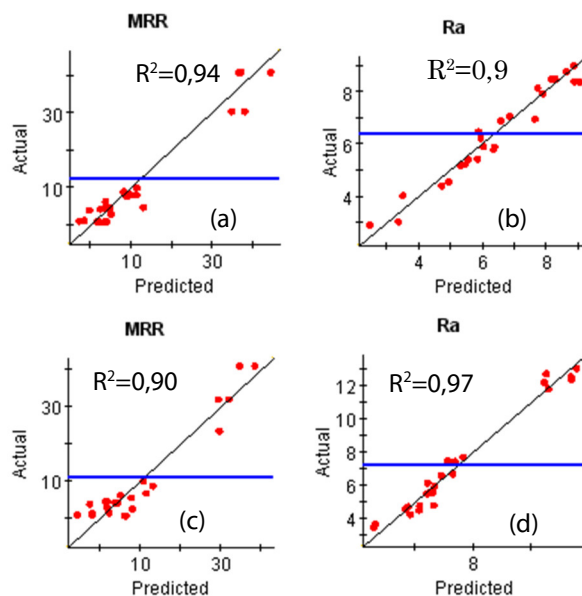
- Đối với điện cực than chì:

$$y_1 = 33,65 - 2,53x_1 - 1,9467x_2 + 1,0602x_3 - 0,7638x_4 + 1,3401x_1^2 + 0,0277x_2^2 + 0,0233x_3^2 + 0,0103x_4^2 - 0,0274x_1x_2 - 0,4761x_1x_3 - 0,1397x_1x_4 + 0,0554x_2x_3 + 0,0188x_2x_4 + 0,0162x_3x_4 \quad (5)$$

$$y_2 = 47,16 - 3,0816x_1 - 0,4405x_2 - 0,1540x_3 - 1,1468x_4 + 0,3595x_1^2 + 0,0361x_2^2 + 0,058x_3^2 + 0,009x_4^2 - 0,047x_1x_2 - 0,043x_1x_3 - 0,001x_1x_4 + 0,018x_2x_3 + 0,005x_2x_4 - 0,0002x_3x_4 \quad (6)$$

trong đó: y₁ là năng suất gia công hay năng suất bóc tách vật liệu (còn gọi là MRR), y₂ là độ nhám bề mặt gia công (còn gọi là SR); x₁ là dòng điện (I), x₂ là điện áp (V), x₃ là thời gian mở xung (T_{on}) và x₄ là thời gian tắt xung (T_{off}).

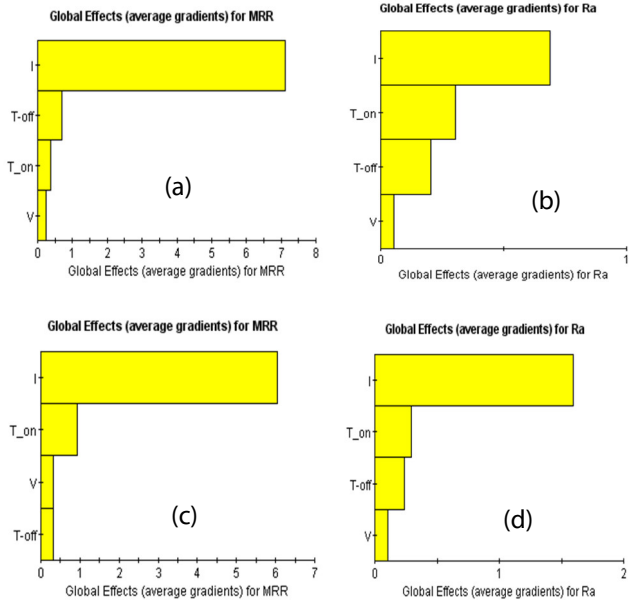
Độ chính xác của các mô hình hồi quy được đánh giá bằng hệ số xác định R². Kết quả phân tích trên hình 3 cho thấy các R² đều lớn hơn 0,90. Chỉ số thống kê này giúp khẳng định mô hình bậc 2 có độ chính xác tương đối cao.



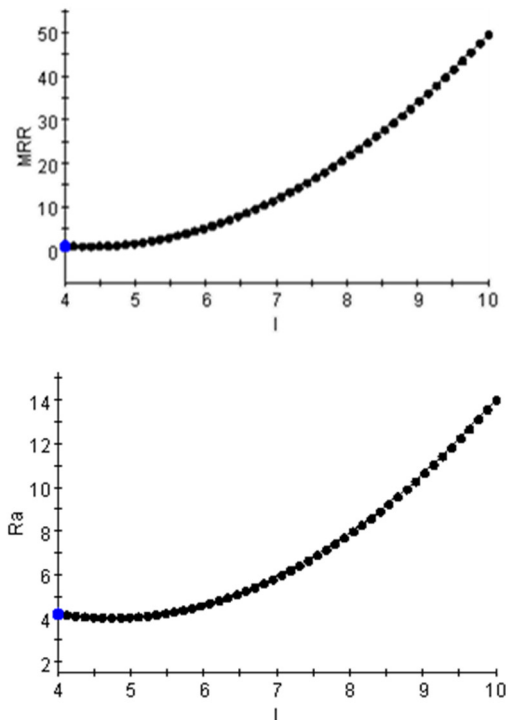
Hình 3. So sánh sai số giữa giá trị quan sát và giá trị ước lượng của mô hình hồi quy (a, b) điện cực đồng đỏ, (c, d) điện cực than chì

Kết quả phân tích mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ gia công EDM đến năng suất gia công và độ

nhám bề mặt được trình bày trên hình 4. Kết quả cho thấy cường độ dòng điện là yếu tố quyết định đến năng suất gia công và chất lượng bề mặt. Điều này cũng được thể hiện trên giá trị của các hệ số của các phương trình hồi quy (3), (4), (5) và (6). Hệ số đứng trước các số hạng x_1 và x_1^2 có giá trị lớn hơn nhiều so với các hệ số đứng trước các số hạng x_2, x_3 và x_4 cũng cho thấy cường độ dòng điện có ảnh hưởng lớn nhất.



Hình 4. Mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ gia công đối với năng suất gia công (MRR) và độ nhám bề mặt (R_a): (a, b) đồng đồ, (c, d) than chì.



Hình 5. Đồ thị biểu thị sự ảnh hưởng của cường độ dòng điện đến năng suất gia công và độ nhám (trường hợp điện cực than chì)

Ngoài ra, từ phương trình hồi quy (5) và (6), có thể quan sát được dạng đồ thị sự phụ thuộc của năng suất bóc tách vật liệu (MRR) và độ nhám bề mặt gia công phụ thuộc vào cường độ dòng điện (hình 5 - trường hợp của điện cực than chì). Kết quả cho thấy rằng năng suất gia công và độ nhám bề mặt chi tiết gia công phụ thuộc phi tuyến vào cường độ dòng điện.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm đối với điện cực đồng đồ và điện cực than chì

STT	Dòng điện	Điện áp	T_{on}	T_{off}	Năng suất gia công (MRR, mm ³ /ph)		Độ nhám gia công (R_a , μ m)	
					Đồng đồ	Than chì	Đồng đồ	Than chì
1	4	60	5	4	1,05	1,39	3,05	3,46
2	4	60	5	12	0,90	0,83	5,24	5,94
3	10	60	5	8	41,00	32,05	8,50	11,81
4	10	60	5	12	30,50	32,00	9,00	12,39
5	7	50	2	8	9,00	8,73	5,45	5,58
6	7	70	2	8	6,30	4,28	5,43	4,76
7	7	50	8	8	8,15	6,28	7,95	7,43
8	7	70	8	8	4,75	3,77	6,90	6,59
9	4	50	5	8	1,19	1,37	5,20	4,79
10	4	70	5	8	0,79	0,68	4,05	4,56
11	10	50	5	8	41,00	41,00	8,40	13,04
12	10	70	5	8	30,50	23,55	8,80	12,71
13	7	60	2	4	8,15	6,73	4,42	4,24
14	7	60	8	4	7,73	4,49	6,24	5,50
15	7	60	2	12	3,00	2,62	5,92	5,54
16	7	60	8	12	4,50	3,04	8,16	7,68
17	4	60	2	8	0,90	1,00	2,92	3,67
18	4	60	8	8	0,85	0,69	5,81	5,56
19	10	60	2	8	41,00	41,00	8,5	12,21
20	10	60	8	8	41,08	23,55	8,4	12,54
21	7	50	5	4	10,00	10,10	6,49	6,14
22	7	70	5	4	4,75	4,49	4,57	4,5
23	7	50	5	12	4,30	5,54	7,09	7,51
24	7	70	5	12	3,95	3,04	6,98	6,68
25	7	60	5	8	4,75	4,10	5,90	4,70

3.2. So sánh năng suất và chất lượng bề mặt gia công giữa điện cực đồng đồ và than chì

Kết quả phân tích t-Test được trình bày ở bảng 4. Giá trị trung bình năng suất gia công của than chì là 10,6mm³/phút trong khi đó năng suất gia công của điện cực đồng đồ là 12,4mm³/phút. Do đó, điện cực đồng đồ có năng suất gia công cao hơn 16,4% so với điện cực than chì.

Giá trị của $P(T \leq t)$ one-tail = 0,019 và $P(T \leq t)$ two-tail = 0,038 đều nhỏ hơn 0,05 nên kết quả thống kê có ý nghĩa.

Bảng 4. Kết quả kiểm định t-Test đối với năng suất gia công giữa điện cực than chì và điện cực đồng đỏ

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	Điện cực than chì	Điện cực đồng đỏ
Mean	10,6468	12,4004
Variance	170,7678143	220,4189623
Observations	25	25
Pooled Variance	195,5933883	
df	48	
t Stat	-0,443310949	
P(T<=t) one-tail	0,329766292	
t Critical one-tail	1,677224196	
P(T<=t) two-tail	0,659532585	
t Critical two-tail	2,010634758	

Kết quả phân tích t-Test để so sánh về độ nhám gia công giữa điện cực than chì và điện cực đồng đỏ được trình bày ở bảng 5. Kết quả trung bình của than chì là 7,2µm trong khi đó độ nhám bề mặt chi tiết gia công của điện cực đồng đỏ là 6,4µm. Do đó, điện cực đồng đỏ gia công chi tiết có độ nhám thấp hơn 11,2% so với điện cực than chì.

Giá trị của P(T<=t) one-tail = 0,018 và P(T<=t) two-tail = 0,036 đều nhỏ hơn 0,05 nên kết quả thống kê có ý nghĩa.

Như vậy, điện cực đồng đỏ có tính năng gia công tốt hơn so với điện cực than chì (năng suất bóc tách vật liệu cao hơn, độ nhám bề mặt chi tiết gia công nhỏ hơn). Điều này phù hợp với thực tiễn sản xuất khi giá thành vật liệu và chi phí gia công chế tạo điện cực đồng đỏ cao hơn so với điện cực than chì với cùng một kích thước hoặc thể tích điện cực.

Bảng 5. Kết quả kiểm định t-Test đối với độ nhám bề mặt chi tiết gia công giữa điện cực than chì và đồng đỏ

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	Điện cực than chì	Điện cực đồng đỏ
Mean	7,1812	6,3748
Variance	10,35145267	3,229276
Observations	25	25
Pooled Variance	6,790364333	
df	48	
t Stat	1,094104961	
P(T<=t) one-tail	0,139684579	
t Critical one-tail	1,677224196	
P(T<=t) two-tail	0,279369158	
t Critical two-tail	2,010634758	

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp thực nghiệm và thống kê để xây dựng mối quan hệ toán học giữa các thông số công nghệ gia công EDM (dòng điện, điện áp đánh lửa, thời mở xung và thời gian tắt xung) đến năng suất bóc tách

vật liệu và độ nhám bề mặt gia công. Các kết luận được đưa ra thông qua nghiên cứu này:

- Mô hình hồi quy bậc 2 là mô hình có độ chính xác tương đối cao để có thể đoán được kết quả gia công với thông số được cài đặt trước.

- Cường độ dòng điện là thông số quan trọng nhất ảnh hưởng đến năng suất bóc tách vật liệu. Dòng điện gia công càng lớn thì năng suất gia công càng lớn, tuy nhiên độ nhám bề mặt chi tiết gia công càng cao (chỉ phù hợp cho gia công thô).

- Khi so sánh kết quả gia công giữa điện cực đồng đỏ và than chì, điện cực đồng đỏ tạo ra chi tiết có độ nhám bề mặt thấp hơn 11,2% và năng suất gia công cao hơn 16,4% so với điện cực than chì. Điều này cho thấy điện cực đồng đỏ có tính chất gia công EDM tốt hơn so với điện cực than chì.

- Kết quả của nghiên cứu này làm cơ sở dữ liệu để ra quyết định trong việc lựa chọn thông số công nghệ gia công và lựa chọn điện cực khi gia công EDM cho vật liệu thép P20.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Younis M.A., et al., "Effect of electrode material on electrical discharge machining of tool steel surface." *Ain Shams Engineering Journal*, 6(3): p. 977-986, 2015.
- [2]. Gopalakannan S., T. Senthilvelan, "Effect of Electrode Materials on Electric Discharge Machining of 316 L and 17-4 PH Stainless Steels." *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11: p. 685-690, 2012.
- [3]. Selvarajan L., et al., "An experimental investigation and optimization of performance measures in EDM using copper and graphite electrodes." *Materials Today: Proceedings*, 46: p. 9341-9347, 2021.
- [4]. Sonker P.K., B. Nahak, T. Jackson Singh, "Comparative study of copper and graphite electrodes performance in Electrical Discharge Machining (EDM) of die steel." *Materials Today: Proceedings*, 68: p. 167-170, 2022.
- [5]. Amorim F.L., W.L. Weingaertner, "The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 29, 2022.
- [6]. Klocke F., et al., "Analysis of Material Removal Rate and Electrode Wear in Sinking EDM Roughing Strategies using Different Graphite Grades." *Procedia CIRP*, 6: p. 163-167, 2013.

AUTHORS INFORMATION

Dang Xuan Phuong¹, Vu Ngoc Chien¹, Nguyen Thi Lieu²

¹Nha Trang University, Vietnam

²Sao Do University, Vietnam