

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ ĐIỆN ĐẾN TỐC ĐỘ BỐC TÁCH VẬT LIỆU KHI GIA CÔNG THÉP 9XC BẰNG PHƯƠNG PHÁP EDM

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF ELECTRICAL PARAMETERS ON MATERIAL REMOVAL RATE IN EDM OF 9XC STEEL

Đặng Xuân Thao^{1*}, Nguyễn Hồng Sơn¹, Bùi Hải Lê²

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: xuanthao.hau@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của điện áp đánh lửa (U_d) và dòng điện phóng (I_d) đến năng suất gia công (Q), hay còn gọi là tốc độ bóc tách vật liệu (MRR). Khi gia công thép 9XC trên máy xung điện EDM CM 323C. Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao, nhóm tác giả đã xây dựng mô hình toán học hồi quy dạng hàm số mũ để biểu diễn mối tương quan giữa các thông số đầu vào và đầu ra. Kết quả cho thấy cả (U_d) và (I_d) đều có tác động tỉ lệ thuận đến năng suất, trong đó dòng điện phóng (I_d) thể hiện mức độ ảnh hưởng lớn hơn cả. Đây là cơ sở khoa học quan trọng giúp tối ưu hóa chế độ công nghệ nhằm nâng cao hiệu quả sản xuất khi gia công các loại thép hợp kim dụng cụ.

Từ khóa: Gia công tia lửa điện; Thép 9XC; Năng suất gia công; Quy hoạch thực nghiệm.

ABSTRACT

This paper presents the results of an experimental study on the influence of ignition voltage (U_d) and discharge current (I_d) on machining productivity (Q), also referred to as the Material Removal Rate (MRR), during the Electrical Discharge Machining (EDM) of 9XC alloy tool steel using a CM 323C machine. By employing the orthogonal experimental design method, a mathematical regression model in the form of an exponential function was developed to represent the correlation between input parameters and output performance. The findings indicate that both (U_d) and (I_d) are directly proportional to the MRR, with the discharge current (I_d) exerting a more dominant influence. These results provide a significant scientific basis for optimizing technological parameters to enhance production efficiency when machining alloy tool steels.

Keywords: Electrical Discharge Machining; 9XC alloy steel; Material Removal Rate; Design of Experiments.



1. GIỚI THIỆU

Trong ngành chế tạo khuôn mẫu hiện đại, các vật liệu có độ cứng cao như SKD11, SKD61 và thép hợp kim dụng cụ 9XC được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng chịu mài mòn và độ bền nhiệt tốt. Tuy nhiên, đặc tính cơ lý này gây khó khăn lớn cho các phương pháp gia công cơ truyền thống. Gia công tia lửa điện (EDM) đã trở thành giải pháp then chốt nhờ khả năng gia công không phụ thuộc vào độ cứng vật liệu [1].

Mặc dù phổ biến, việc lựa chọn thông số công nghệ tại các cơ sở sản xuất trong nước hiện nay chủ yếu dựa trên kinh nghiệm hoặc tài liệu hướng dẫn đi kèm máy, vốn thường mang tính chất tổng quát và chưa tối ưu cho từng loại vật liệu cụ thể. Điều này dẫn đến hiệu suất máy chưa được khai thác triệt để. Do đó, việc nghiên cứu xây dựng mô hình toán học xác định mối liên hệ giữa các thông số điện đến năng suất gia công (Q) là hết sức cần thiết [2].

2. ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

- Máy: Máy sử dụng cho việc nghiên cứu là máy xung điện CM 323C, đặt tại Trung tâm Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội (Hình 2-1).

- Thông số máy: Máy xung điện CM 323C (Bảng 2-1) [3].

- Vật liệu: Thép 9XC, kích thước $\varnothing 25 \times 10\text{mm}$, được nhiệt luyện đạt độ cứng $52 \div 54\text{HRC}$ (Hình 2-2).

- Thành phần hóa học của thép 9XC (Bảng 2-2).

- Điện cực gia công: Đồng đỏ $\varnothing 15\text{mm}$ (Hình 2-3).

- Thiết bị đo: Panme đo sâu (Hình 2-4).



Hình 2-1. Máy xung điện CM

Bảng 2-1. Thông số kỹ thuật máy xung điện CM 323C

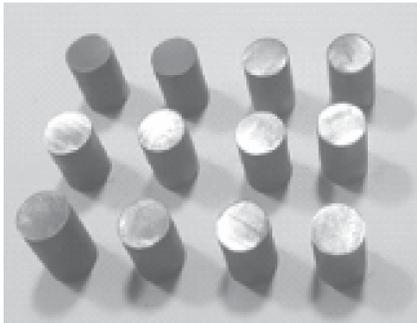
Nội dung	Thông số
Kích thước máy (W × D × H)	1200 × 1350 × 2250mm
Kích thước bàn từ (W × D)	500 × 350mm
Phạm vi làm việc (X, Y)	300 × 200mm
Phạm vi làm việc (Z)	300mm
Trọng lượng lớn nhất của điện cực	60kg
Trọng lượng lớn nhất của phôi	500kg
Trọng lượng của máy	1000kg
Tốc độ lớn nhất của máy	350mm/p
Độ nhám R_a có thể gia công	0,25 μm



Hình 2-2. Thép 9XC

Bảng 2-2. Thành phần hóa học của thép thí nghiệm.

Mác thép	Thành phần hóa học			
	%C	%Si	%Mn	%Cr
9XC	0,85 ÷ 0,95	1,2 ÷ 1,6	0,3 ÷ 0,6	0,95 ÷ 1,25



Hình 2-3. Điện cực đồng, Ø15.



Hình 2-4. Panme đo sâu.

2.2. Phạm vi nghiên cứu

Thực nghiệm được thiết kế dựa trên phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao với 12 mẫu thử. Hai thông số biến thiên chính là [3]:

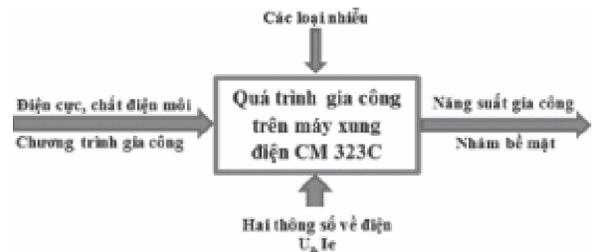
- Điện áp đánh lửa (U_z): Khảo sát trong khoảng (40 ÷ 70)V.
- Dòng điện phóng (I_c): Khảo sát trong khoảng (2 ÷ 8)A.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện gia công trên 12 mẫu thí nghiệm, vật liệu cắt thép 9XC. Các mẫu được tiến hành gia công trên máy xung điện MC 323C với thông số đầu vào U_z và I_c thay đổi; Sử dụng phương pháp quy hoạch trực giao, xác định được thông số thí nghiệm và tiến hành thực nghiệm. Đo, kiểm tra đánh giá kích thước sau khi gia công, xác định được mối quan hệ giữa năng suất gia công với điện áp đánh lửa U_z và dòng phóng tia lửa I_c [4, 5].

3. THỰC NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

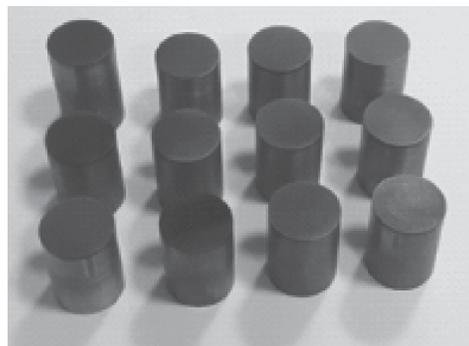
3.1. Mô hình hóa quá trình gia công



Hình 3-1. Mô hình hóa quá trình gia công.



Hình 3-2. Ảnh mẫu thí nghiệm sau khi gia công



Hình 3-3. Điện cực sau khi gia công.

3.2. Lựa chọn số thực nghiệm

* Số điểm thí nghiệm N theo quy hoạch thực nghiệm là [6, 8]:

$$N = k^2 \quad (1)$$

Trong đó: N - Số thí nghiệm; k - Số biến đầu vào.

Với biến đầu vào k = 2, ta có số thí nghiệm N = 4. Như vậy, sau khi kiểm tra, tác giả đã xây dựng được thông số thí nghiệm (Bảng 3-1).

Bảng 3-1. Bảng thông số thí nghiệm

N	U _z	I _c	Y _{t1}	Y _{t2}	\bar{Y}_i	S _i ²
1	40	2	90,62	90,12	90,37	0,125
2	50	4	31,30	31,50	31,40	0,020
3	60	6	21,70	21,30	21,50	0,080
4	70	8	17,50	17,84	17,67	0,060

Trong đó: \bar{Y}_i là giá trị trung bình; S_i² là phương sai.

Để kiểm tra tính đồng nhất của thí nghiệm cần xác định tỷ số giữa phương sai lớn nhất và tổng các phương sai theo công thức (3.1) sau:

$$G_p = \frac{\max S_i^2}{\sum S_i^2} = \frac{0,125}{(0,125+0,02+0,08+0,06)} = 0,438 \quad (3.1)$$

* Kiểm tra tính đồng nhất của thí nghiệm: Sử dụng tiêu chuẩn Cochran để kiểm tra tính ổn định của các số liệu thực nghiệm. Với giá trị tính toán G_p = 0,438 nhỏ hơn giá trị tra bảng G_T = 0,684 (n = 4, m = 1) [3, 4], như vậy G_p < G_T, các thí nghiệm được xác nhận là có tính đồng nhất và đủ độ tin cậy để xây dựng mô hình toán học.

3.3. Ảnh hưởng của điện áp đánh lửa U_z tới năng suất gia công Q

Năng suất gia công (Q) được xác định dựa trên thể tích lớp kim loại bị bóc tách (V) trên một đơn vị thời gian (t) [8, 9]:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{mm}^3/\text{phút}) \quad (1)$$

Trong đó:

Q – Năng suất xung (mm³/phút).

t – Thời gian xung (phút).

V – Thể tích lớp kim loại bị tách ra khỏi vật liệu (mm³).

Thể tích lớp kim loại bị tách ra khỏi vật liệu V được xác định như sau:

$$V = s \times h \quad (2)$$

Trong đó:

s – Diện tích bề mặt xung (mm²).

h – Chiều sâu vết xung (mm).

Đối với mẫu thí nghiệm đã chọn, gia công trên điện cực có cùng kích thước. Như vậy diện tích, chiều sâu đối với từng mẫu là giống nhau và bằng: s = 7,5² × 3,14 (mm²); h = 1,0 (mm).

Vậy thể tích lớp kim loại bị tách ra khỏi vật liệu V = 176,625 (mm³).

Để xác định ảnh hưởng của điện áp đánh lửa tới năng suất gia công, ta tiến hành làm 4 thí nghiệm ứng với 4 mẫu thử có thứ tự (1 ÷ 4), trong quá trình thí nghiệm, các thông số khác được giữ cố định, chỉ có điện áp đánh lửa thay đổi [8-9].

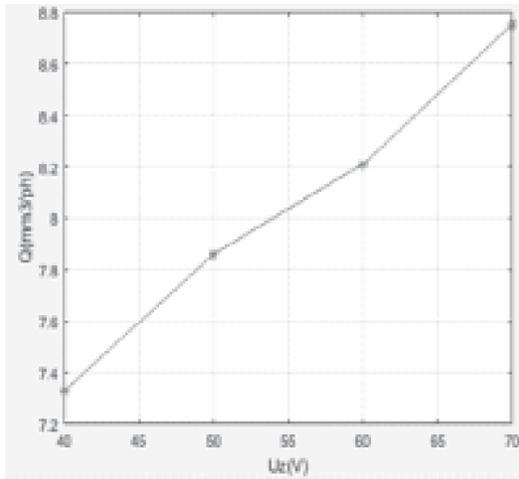
Kết quả đo được sự ảnh hưởng của U_z tới Q được thể hiện (Bảng 3-2).

Bảng 3-2. Ảnh hưởng của U_z tới Q và R_a

Mẫu TN	U _z (V)	I _c (A)	t (phút)	Q (mm ³ /ph)
1	70	6	20,17	8,75
2	60		21,50	8,21
3	50		22,45	7,86
4	40		24,07	7,33

Từ Bảng 3-2, ta thấy được sự ảnh hưởng của điện áp đánh lửa U_z tới năng suất gia công xung Q là tuyến tính vì a tăng thì b cũng tăng. Do đó, ta xây dựng công thức thực nghiệm quan hệ giữa hai thông số này dạng:

$$Q = a + b.U_z \quad (3)$$



Hình 3-4. Đồ thị thực nghiệm biểu diễn quan hệ giữa Q và U_z

Dùng phần mềm Matlab để xác định hàm quan hệ giữa năng suất cắt và điện áp đánh lửa (Hình 3-4) [7].

Đồng thời, ta xác định được phương trình quan hệ giữa năng suất xung và điện áp đánh lửa:

$$Q = 5,5020 + 0,0461.U_z \quad (4)$$

3.4. Ảnh hưởng của cường độ dòng phóng tia lửa điện I_c tới năng suất gia công Q

Để xác định ảnh hưởng của thời gian phóng điện tới năng suất gia công, ta tiến hành làm 4 thí nghiệm ứng với 4 mẫu thử có thứ tự (5 ÷ 8). Trong quá trình thí nghiệm, các thông số khác được giữ cố định, chỉ có cường độ dòng phóng tia lửa điện thay đổi.

Kết quả đo được sự ảnh hưởng của I_c tới Q được thể hiện (Bảng 3-3).

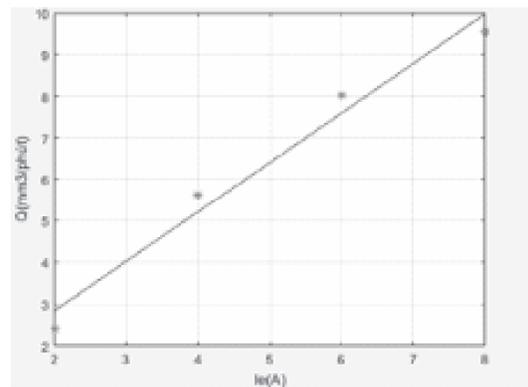
Bảng 3-3. Ảnh hưởng của I_c tới Q và R_a

Mẫu TN	U_z (V)	I_c (A)	t (phút)	Q (mm³/ph)
5	50	8	18,5	9,55
6		6	22,0	8,03
7		4	31,4	5,63
8		2	73,2	2,41

Từ Bảng 3-3, ta thấy ảnh hưởng của cường độ dòng phóng tia lửa điện I_c tới độ nhám bề mặt R_a là tuyến tính vì a tăng thì b cũng tăng. Do đó, ta xây dựng công thức thực nghiệm quan hệ giữa hai thông số này dạng:

$$Q = a + b.I_c \quad (5)$$

Dùng phần mềm Matlab để xác định hàm quan hệ giữa năng suất cắt và cường độ dòng phóng tia lửa điện (Hình 3-5) [7].



Hình 3-5. Đồ thị thực nghiệm biểu diễn quan hệ giữa Q và I_c

Đồng thời, ta xác định được phương trình thể hiện mối quan hệ giữa năng suất xung và cường độ dòng phóng tia lửa điện như sau:

$$Q = 0,4500 + 1,1910.I_c \quad (6)$$

3.5. Ảnh hưởng tổng hợp của điện áp đánh lửa U_z và cường độ dòng phóng tia lửa điện I_c tới năng suất gia công Q

Để xác định ảnh hưởng tổng hợp của U_z và I_c tới năng suất xung gia công, ta sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao. Do số yếu tố ảnh hưởng $k = 2$, do đó số thí nghiệm cần thực hiện $N = 2 \times 2 = 4$.

Ta tiến hành gia công 4 thí nghiệm, với các mẫu thí nghiệm từ (9 ÷ 12). Các thí nghiệm đều được tiến hành với các giá trị cực đại và cực tiểu của U_z và I_c . Qua thí nghiệm và đo kết quả (Bảng 3-4).

Bảng 3-4. Ảnh hưởng tổng hợp của U_z và I_c tới Q và R_a .

Mẫu TN	U_z (V)	I_c (A)	t (phút)	Q (mm ³ /ph)
9	70	8	17,67	10
10	40	8	19,25	9,17
11	70	2	57,72	2,90
12	40	2	90,37	1,95

Dựa vào những kết quả nghiên cứu trước đây, ta có dạng phương trình quan hệ:

$$Q = a \cdot U_z^b \cdot I_c^c \quad (7)$$

Trong đó: a, b, c là các hệ số cần xác định.

Để áp dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao, ta phải biến phương trình về dạng đa thức bậc nhất nhiều biến. Do vậy, ta sử dụng phương pháp logarit hóa hai vế [8, 9]. Ta được phương trình sau khi logarit hóa như sau:

$$\ln Q = \ln a + b \cdot \ln U_z + c \cdot \ln I_c \quad (8)$$

$$\text{Đặt: } y = \ln Q; x_1 = \ln U_z; x_2 = \ln I_c$$

Khi đó, phương trình trở thành dạng tuyến tính bậc nhất như sau:

$$y = \ln a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 \quad (9)$$

Ta có bảng các thông số thí nghiệm được logarit hóa như sau (Bảng 3-5):

Bảng 3-5. Bảng logarit hóa các thông số ảnh hưởng tới Q

Mẫu TN	$x_1 = \ln U_z$	$x_2 = \ln I_c$	$y = \ln Q$
3.1	4,248	2,079	2,303
3.2	3,689	2,079	2,216
3.3	4,248	0,693	1,065
3.4	3,689	0,693	0,668

Bảng ma trận quy hoạch thực nghiệm trực giao hai yếu tố như sau (Bảng 3-6):

Bảng 3-6. Bảng ma trận quy hoạch thực nghiệm cho Q

Mẫu TN	z_1	z_2	x_1	x_2	y
3.1	+ 1	+1	4,248	2,079	2,303
3.2	- 1	+1	3,689	2,079	2,216
3.3	+ 1	-1	4,248	0,693	1,065
3.4	- 1	-1	3,689	0,693	0,668

Theo phương pháp quy hoạch trực giao, phương trình sau khi tìm được sẽ có dạng:

$$y = a' + b' \cdot z_1 + c' \cdot z_2 \quad (10)$$

Trong đó, các hệ số a' , b' , c' được tính theo công thức sau:

$$a' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i = \frac{1}{4}(2,303 + 2,216 + 1,065 + 0,668)$$

$$a' = 1,563$$

$$b' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_{1i} y_i = \frac{1}{4}(2,303 - 2,216 + 1,065 - 0,668)$$

$$b' = 0,121$$

$$c' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_{2i} y_i = \frac{1}{4}(2,303 + 2,216 - 1,065 - 0,668)$$

$$c' = 0,697$$

Phương trình hồi quy thực nghiệm có dạng:

$$y = 1,563 + 0,121z_1 + 0,697.z_2 \quad (11)$$

Chuyển phương trình hồi quy thực nghiệm về biến x_1 và x_2 theo công thức biến đổi như sau:

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\frac{1}{2} \Delta x_i} \quad (12)$$

Trong đó:

\bar{x}_i - Giá trị trung bình các giá trị của x_i ;
 Δx_i - Khoảng chênh lệch giá trị của x_i .

Phương trình hồi quy chuyển về biến x_1 và x_2 như sau:

$$y = 1,563 + \frac{0,121.(x_1 - 3,969)}{0,28} + \frac{0,697.(x_2 - 1,386)}{0,693}$$

$$y = -1,546 + 0,432.x_1 + 1,005.x_2$$

Vậy, ta có các hệ số a, b, c như sau:

$$\ln a = -1,58 \Rightarrow a = 0,213; b = 0,432; c = 1,005$$

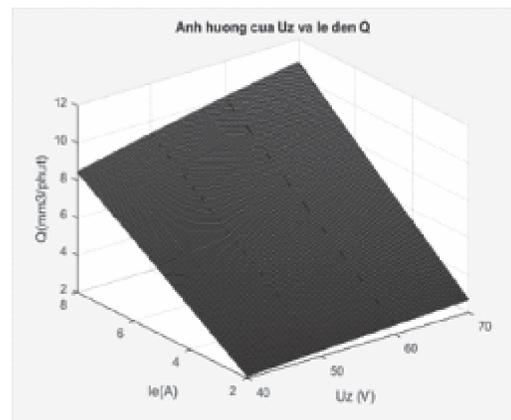
Vậy phương trình thể hiện quan hệ giữa năng suất cắt và điện áp đánh lửa U_z và cường độ dòng phóng tia lửa điện I_c là:

$$Q = 0,213.U_z^{0,432}.I_c^{1,005} \quad (13)$$

Lập trình bằng phần mềm Matlab [7] để vẽ dạng đồ thị của phương trình quan hệ giữa Q và U_z, I_c với đoạn chương trình như sau:

```
U_c = 40 : 0.25 : 70; % khai bao gia tri U_z
I_c = 2 : 0.025 : 8; % khai bao gia tri I_c
[x,y] = meshgrid(U_z,I_c) % Tao ma tran gia tri
Q = 0.213*(x.^ 0.432).*(y.^ 1.005);
surf(x,y,Q);
title('Anh huong cua U_z va I_c den Q');
xlabel('U_z (V)');
ylabel('I_c (A)');
zlabel('Q(mm^3/phut)');
```

Đồ thị 3D (Hình 3-6) biểu diễn quan hệ giữa năng suất xung Q với điện áp đánh lửa U_z và cường độ dòng phóng tia lửa điện I_c như sau:



Hình 3-6. Đồ thị 3D biểu diễn quan hệ giữa Q với U_z và cường độ dòng phóng tia lửa điện

3.6. Đánh giá độ tin cậy của hàm hồi quy thực nghiệm

Độ tin cậy r được đánh giá bằng công thức [9]:

$$r = \frac{\sigma_y^2 - \sigma_y'^2}{\sigma_y^2}$$

Trong đó :

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_y^2 &= \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \\ \sigma_y'^2 &= \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 \end{aligned} \right.$$



Với:

y_i – Năng suất gia công (Q) thực nghiệm.

\bar{y}_i – Giá trị trung bình của giá trị đo năng suất gia công thực nghiệm.

y'_i – Giá trị trung bình của năng suất gia công theo hàm hồi quy thực nghiệm.

N – Số thí nghiệm.

Độ tin cậy của hàm quy hồi r là:

$$r = \frac{\sigma_y^2 - \sigma_{y'}^2}{\sigma_y^2} = \frac{0,065855 - 0,003685}{0,065855} = 0,944043$$

Vậy, độ tin cậy của hàm quy hồi là 94%.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu, thực nghiệm và xử lý số liệu thực nghiệm đã xác định được mối quan hệ toán học giữa điện áp đánh lửa (U_z) với năng suất xung và $Q = 5,5020 + 0,0461.U_z$. Mối quan hệ giữa cường độ dòng phóng tia lửa điện (I_e) tới năng suất gia công $Q = 0,4500 + 1,1910.I_e$ và mối quan hệ giữa điện áp đánh lửa (U_z) và cường độ dòng phóng tia lửa điện (I_e) tới năng suất xung $Q = 0,213.U_z^{0,432}.I_e^{1,005}$.

Từ kết quả nghiên cứu này sẽ giúp cho người làm công nghệ tính toán, lựa chọn được chế độ cắt hợp lý, nâng cao được năng suất, chất lượng bề mặt khi cắt vật liệu thép 9XC trên máy xung điện xung điện CM 323C nói riêng và làm cơ sở lựa chọn chế độ cắt hợp lý trên máy xung điện nói chung. ❖

Ngày nhận bài: **10/12/2025**

Ngày phản biện: **25/12/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nghiêm Hùng, “*Kim loại học và nhiệt luyện*”. NXB. Đại học và Trung học chuyên nghiệp, Hà Nội (1979).
- [2]. Vũ Hoài Ân, “*Gia công tia lửa điện*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật (2005).
- [3]. Chi Hung Machinery & Electric Industrial Co.,LTD. “*Chmer_{EDM} Wire-EDM Quick Start*” (2006).
- [4]. Trần Văn Địch, “*Nghiên cứu độ chính xác gia công bằng thực nghiệm*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật (2003).
- [5]. Nguyễn Tiến Nga, “*Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ chính xác gia công khi gia công cắt dây các vật liệu khó gia công*”. Luận văn thạc sĩ kỹ thuật, Thái Nguyên (2009).
- [6]. Dương Thủy Vi, “*Giáo trình Phương pháp tính*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật (2007).
- [7]. Nguyễn Phùng Quang, “*Matlab & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật (2008).
- [8]. Nguyễn Văn Dự, Nguyễn Đăng Bình, “*Quy hoạch thực nghiệm trong kỹ thuật*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội (2011).
- [9]. Nguyễn Doãn Ý, “*Giáo trình quy hoạch thực nghiệm*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật (2003).