NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN ĐỘ CHÍNH XÁC KÍCH THƯỚC KHI GIA CÔNG THÉP GIÓ SKH51 TRÊN MÁY CẮT DÂY VL600Q

STUDY ON THE INFLUENCE OF CERTAIN TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON DIMENSIONAL ACCURACY IN MACHINING SKH51 HIGH-SPEED STEEL USING VL600Q WIRE CUT MACHINE

Mạc Văn Giang
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Sao Đỏ

TÓM TẮT

Để đánh giá tác động của một số yếu tố công nghệ đến độ chính xác kích thước khi gia công thép gió SKH51 trên máy cắt dây EDM VL600Q, một phương trình hồi quy mới đã được đề xuất dựa trên phương pháp thiết kế thí nghiệm Box-Behnken. Nghiên cứu này đã xác định các yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến độ chính xác gia công của kích thước lỗ. Kết quả của phương pháp thiết kế thí nghiệm với hàm hồi quy đề xuất (1) cho thấy độ chính xác dự đoán của phương trình hồi quy (1) đạt đến 99,47%. Ngoài ra, điện đánh lửa (U_i) có ảnh hưởng lớn nhất đến độ chính xác kích thước trong quá trình gia công (65,13%), trong khi ảnh hưởng của yếu tố công nghệ thời gian ngắt xung (T_{off}) là ít quan trọng nhất (3,68%). Nội dung của bài báo cũng đã thiết lập một chương trình hồi quy để tính toán các thông số công nghệ khi biết trước sai số gia công, đóng vai trò làm cơ sở tham khảo cho việc xác định độ chính xác kích thước khi gia công lỗ trên vật liệu SKH51 bằng máy cắt dây EDM VL600Q.

Từ khóa: *Gia công tia lửa điện; Độ chính xác kích thước; Thông số công nghệ.*

ABSTRACT

To evaluate the impact of certain technological factors on dimensional accuracy when machining SKH51 high-speed steel using the VL600Q wire EDM machine, a new regression equation was proposed based on the Box-Behnken design of experiments method. This study identified the key factors affecting the machining accuracy of hole dimensions. The results from the design of experiments method with the proposed regression function (1) showed that the predictive accuracy of regression equation (1) reached 99.47%. Furthermore, the ignition voltage (U_i) had the most significant impact on dimensional accuracy during machining (65.13%), while the influence of the pulse-off time (T_{off}) technological factor was the least significant (3.68%). The content of the paper also established a regression program to calculate technological parameters given the machining error, serving as a reference for determining dimensional accuracy when machining holes on SKH51 material using the VL600Q wire EDM machine.

Keywords: *Electrical Discharge Machining; Dimensional Accuracy; Technological Parameters.* ☞

1. TỔNG QUAN

Hiện nay, các quy trình gia công độc đáo trong lĩnh vực cơ khí đã thu hút nhiều sự chú ý nghiên cứu nhờ tính chính xác và hiệu quả cao. Đặc biệt, phương pháp cắt dây tia lửa điện (Wire Electrical Discharge Machining – WEDM) đang trở nên phổ biến do khả năng gia công vật liệu cứng, bền và phức tạp mà các phương pháp truyền thống khó thực hiện [1, 2].

Trong quá trình gia công lỗ bằng WEDM, độ chính xác được đánh giá qua dung sai kích thước đường kính và độ không tròn [3]. Các yếu tố công nghệ như thành phần vật liệu, loại điện cực, điện áp đánh lửa, thời gian phóng tia lửa, tính dẫn điện và nhiệt của vật liệu ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả gia công. Việc nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố này là cần thiết để xác định các thông số công nghệ hợp lý [4].

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra các yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến độ chính xác và hiệu suất gia công, như nghiên cứu của Muhammad Umar Farooq về Ti6Al4V và Trần Quốc Hùng về SKD11. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu đầy đủ về ảnh hưởng của nhiều thông số công nghệ đến dung sai kích thước đường kính khi gia công thép SKH51 trên máy cắt dây VL600Q [5, 6].

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung vào các thông số cơ bản như điện áp đánh lửa (U_i), thời gian phóng tia lửa (T_{on}), thời gian tắt xung (T_{off}) và tốc độ chạy dây (W_s) ảnh hưởng đến chất lượng kích thước lỗ (Y). Kết quả thí nghiệm và phân tích bằng Minitab 19 cho thấy U_i, T_{on} và W_s đều ảnh hưởng đáng kể đến dung sai kích thước lỗ, cung cấp cơ sở cho việc lựa chọn các thông số công nghệ hợp lý, nâng cao độ chính xác và hiệu quả gia công. Nghiên cứu này góp phần hiểu rõ hơn về ảnh hưởng của các thông số công nghệ khi gia công thép SKH51 trên máy cắt dây VL600Q và mở ra hướng phát triển cho các nghiên cứu tiếp theo, cải thiện chất lượng sản phẩm và hiệu suất trong ngành cơ khí chính xác tại Việt Nam.

2. VẬT LIỆU VÀ THIẾT BỊ

2.1. Thiết bị thí nghiệm

Thiết bị phục vụ thực nghiệm là máy cắt dây tia lửa điện VL600Q tại Công ty cổ phần Cơ khí Hưng Đạo, Chí Linh, Hải Dương.

Hình 1. Máy cắt dây VL600Q

Máy cắt dây tia lửa điện VL600Q có các thông số làm việc cơ bản như sau:

- Kích thước gia công tối đa: X/Y/Z = 600/400/270;
- Độ chính xác đạt được tối đa: ±0,03mm;
- Điện áp phóng tia lửa điện U_i: 50 ÷ 125 V;
- Cường độ dòng điện xung I_i: 2 ÷ 32 A;
- Thời gian bật xung T_{on}: 1 ÷ 9 µs/s;
- Thời gian tắt xung T_{off}: 2 ÷ 18 µs/s;
- Tốc độ chạy dây W_s: 0 ÷ 420 mm/s;
- Lực căng dây W_T : 490 ÷ 2400 g;
- Áp lực nước và chất điện môi W_L: 0 ÷ 16 kg/cm^2.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 318, tháng 8 năm 2024
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

2.2. Chọn dụng cụ đo

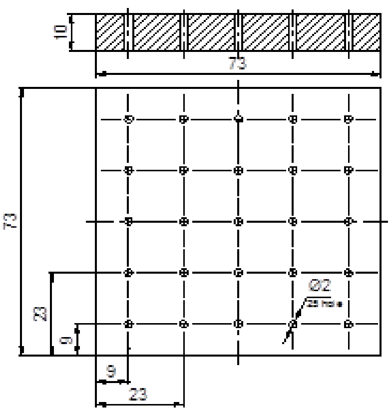
Panme đo lỗ 3 chấu, thang đo 1µm Mitutoyo Nhật Bản 368-163 có các thông số kỹ thuật như sau: Phạm vi đo từ 10 ÷ 12mm; Độ chia là 0,001mm; Độ chính xác là ±2µm.

2.3. Vật liệu điện cực

Vật liệu điện cực được sử dụng là dây đồng có đường kính 0,2mm của Hãng Pungkuk (Hàn Quốc) có ký hiệu CuZn35, độ bền kéo căng cơ học 750 ÷ 790N/mm^2. Đây là loại vật liệu điện cực thông dụng, đang được dùng phổ biến trong công nghệ gia công tia lửa điện hiện nay.

3. XÂY DỰNG THÍ NGHIỆM

Mẫu thí nghiệm là thép gió SKH51, còn được biết đến là thép M2 theo tiêu chuẩn AISI của Hoa Kỳ, là một loại thép công cụ tốc độ cao (HSS – High-Speed Steel) có hàm lượng molypden và vanadi cao, cho phép nó giữ được độ cứng tốt ngay cả khi làm việc ở nhiệt độ cao. Đây là một trong những loại thép phổ biến nhất trong việc sản xuất các dụng cụ cắt kim loại nhờ vào tính chất ưu việt, được sử dụng chế tạo: Dụng cụ cắt kim loại, khuôn mẫu, các chi tiết máy chịu tải trọng nặng, dụng cụ đo, các chi tiết trong ngành hàng không, vũ trụ.



Hình 2. Bản vẽ mẫu thí nghiệm

3.1. Tiến hành thực nghiệm

- Các thông số (biến) sẽ thay đổi trong quá trình thí nghiệm bao gồm U_i, T_{on} và W_s:

+ $X_1 = U_i = 70 \div 80$ V;
+ $X_2 = T_{on} = 2 \div 8$ µs;
+ $X_3 = T_{off} = 4 \div 12$ µs;
+ $X_4 = W_s = 6 \div 10$ mm/s.

- Các thông cố định chọn phù hợp với máy thí nghiệm, cụ thể:

+ Lực căng dây tương ứng mức 10, tương ứng với: W_T = 1390 g;

+ Áp lực nước và dung môi tương ứng với mức 4, tương ứng với: W_L = 10 kg/cm^2;

+ Cường độ dòng điện xung tự động điều chỉnh theo điện áp phóng tia lửa điện.

- Theo [6], để giảm chi phí và vẫn đảm bảo độ chính xác của phương trình hồi quy, sử dụng phương pháp quy hoạch Taguchi. Biến mã hóa được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Biến mã hóa các thông số đầu vào

STT	Biến số	Các mức thực nghiệm		
		Mức min	Mức giữa	Mức max
1	$X_1 = U_i$ (V)	50	60	70
2	$X_2 = T_{on}$ (µs)	2	5	8
3	$X_3 = T_{off}$ (µs)	4	8	12
4	$X_4 = W_s$ (mm/s)	6	8	10
5	Biến mã hóa	-1	0	+1

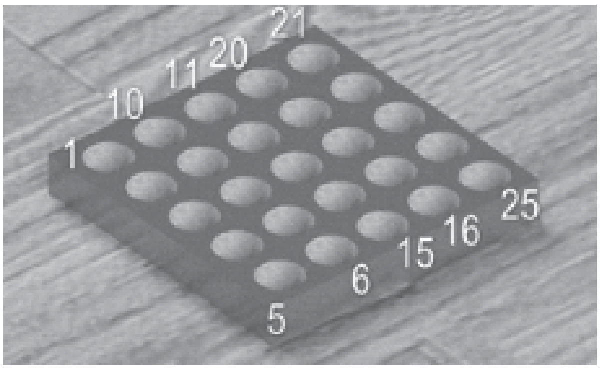
☞

Theo [6], sử dụng phương pháp quy hoạch Box-Behnken Design với tổng số thí nghiệm là N = 2k + 2.k + 1 = 25 thí nghiệm. Tiến hành gia công tại 25 vị trí với các thông số đầu vào được điều chỉnh, sau khi gia công tiến hành đo 3 lần tại các vị trí, đo giá trị đường kính trung bình tại các vị trí (D_{tt}). Tính toán độ chính xác kích thước $Y = D_{tt} - D_{dn}$ và quy đổi ra đơn vị đo µm, kết quả thực nghiệm được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm

TT	U_i (V)	T_{on} (µs/s)	T_{off} (µs/s)	W_s (mm/s)	D_{tt} (mm)	D_{dn} (mm)	$Y = D_{tt} - D_{dn}$ (µm)
1	60	5	4	6	11,008	11	8
2	60	5	12	6	11,005	11	5
3	60	5	8	10	11,015	11	15
4	60	5	12	10	11,013	11	13
5	50	2	8	8	11,014	11	14
6	70	2	8	8	11,001	11	1
7	50	8	8	8	11,022	11	22
8	70	8	8	8	11,007	11	7
9	50	5	8	6	11,014	11	14
10	70	5	8	6	10,998	11	-2
11	50	5	8	10	11,022	11	22
12	70	5	8	10	11,008	11	8
13	60	2	4	8	11,008	11	8
14	60	8	4	8	11,016	11	16
15	60	2	12	8	11,005	11	5
16	60	8	12	8	11,013	11	13
17	60	2	8	6	11,003	11	3
18	60	8	8	6	11,01	11	10
19	60	2	8	10	11,011	11	11
20	60	8	8	10	11,019	11	19
21	50	5	4	8	11,019	11	19
22	70	5	4	8	11,005	11	5
23	50	5	12	8	11,016	11	16
24	70	5	12	8	11,002	11	2
25	60	5	8	8	11,011	11	11

Chi tiết sau khi gia công được trình bày trong hình 3.



Hình 3. Các chi tiết sau khi gia công

3.2. Phân tích thực nghiệm

Sử dụng phần mềm thống kê Minitab 19 để phân tích kết quả trong bảng 4 cho hàm mục tiêu Y, ta được kết quả như trong bảng 3, 4.

Bảng 3. Mức độ hồi quy của mô hình thực nghiệm

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
0,40908	99,67%	99,6%	99,47%

Nhận xét về bảng 3: Với các giá trị trên, chúng ta có thể thấy rằng mô hình hồi quy rất phù hợp và có độ chính xác cao trong việc giải thích và dự đoán độ chính xác kích thước (Y). Các hệ số R-squared, R-squared điều chỉnh và R-squared dự đoán đều rất cao, chỉ ra rằng mô hình hồi quy là mạnh mẽ và đáng tin cậy.

Bảng 4. Mức độ tương thích của mô hình thực nghiệm

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	O = 32,872	0,903	36,41	0	
X_1	A = -0,7074	0,0118	-59,91	0	1
X_2	B = 1,2436	0,0394	31,60	0	1
X_3	C = -0,3992	0,310	-12,87	0	1
X_4	D = 2,1453	0,593	36,20	0	1

Nhận xét về bảng 4:

- Ý nghĩa thống kê: Tất cả các hệ số hồi quy có giá trị p < 0,05, chỉ ra rằng tất cả các biến độc lập (U_i, T_{on}, T_{off}, W_s) đều có tác động đáng kể đến biến phụ thuộc (Y). Các hệ số của các biến độc lập đều có ý nghĩa thống kê cao, cho thấy rằng các biến này là các yếu tố quan trọng trong việc dự đoán độ chính xác kích thước.

- Hệ số và tác động: U_i có hệ số âm, chỉ ra rằng khi điện áp tăng, độ chính xác kích thước giảm. T_{on} và W_s có các hệ số dương, chỉ ra rằng khi thời gian phóng điện và tốc độ cắt tăng, độ chính xác kích thước cải thiện. T_{off} có hệ số âm, chỉ ra rằng khi thời gian ngắt xung tăng, độ chính xác kích thước giảm.

- Đa cộng tuyến: Không có đa cộng tuyến giữa các biến độc lập (VIF = 1,0 < 5,0).

- Từ bảng 4 xây dựng được phương trình hồi quy xác định độ chính xác kích thước như sau:

☞

$Y = 32{,}872 - 0{,}7074.U_i + 1{,}2436.T_{on} - 0{,}3992.T_{off} + 2{,}1453.W_s$ (1)

Nhận xét chung: Phương trình hồi quy (1) được xây dựng là phù hợp và có ý nghĩa thống kê cao, và nó được sử dụng để dự đoán độ chính xác kích thước (Y) dựa trên các thông số đầu vào của quy trình thực nghiệm (U_i, T_{on}, T_{off}, W_s).

- Tính toán mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ chính xác kích thước:

+ Bước điều chỉnh trên máy với ΔU_i = 10V, do đó mức độ ảnh hưởng của U_i lên Y là:

$10.|A|/(10.|A|+|B|+|C|+|D|) = 65{,}13\%$ (2)

+ Bước điều chỉnh trên máy với ΔT_{on} = 1µs, do đó mức độ ảnh hưởng của T_{on} lên Y là:

$B/(10.|A|+|B|+|C|+|D|) = 11{,}45\%$ (3)

+ Bước điều chỉnh trên máy với ΔT_{off} = 1µs, do đó mức độ ảnh hưởng của T_{off} lên Y là:

$C/(10.|A|+|B|+|C|+|D|) = 3{,}68\%$ (4)

+ Bước điều chỉnh trên máy với ΔW_s = 1m/s, do đó mức độ ảnh hưởng của W_s lên Y là:

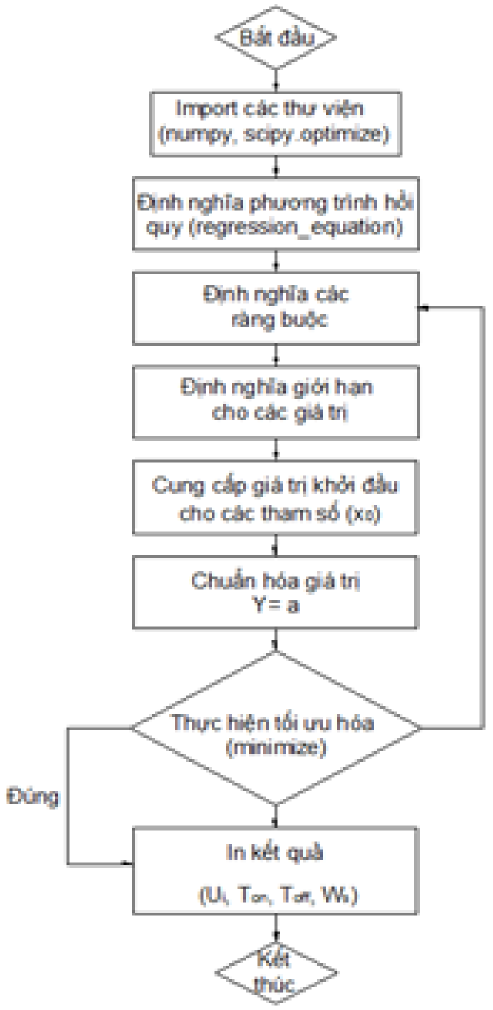
$D/(10.|A|+|B|+|C|+|D|) = 19{,}75\%$ (5)

Nhận xét: Điện áp đánh lửa (U_i) là thông số điều chỉnh quan trọng nhất đối với độ chính xác kích thước, vì mức độ ảnh hưởng của nó đạt đến 65,13%, lớn nhất trong số bốn thông số công nghệ được đề cập ở trên.

3.3. Khảo nghiệm phương trình hồi quy (1)

Từ phương trình (1), có thể thấy rằng việc tính toán các giá trị thông số đầu vào (U_i, T_{on}, T_{off}, W_s) khi biết trước sai số kích thước Y = a (µm), gặp rất nhiều khó khăn. Do đó, để tối ưu hóa quá trình tính toán, một chương trình Python kết hợp với các thư viện numpy và scipy.optimize được sử dụng. Chương trình được xây dựng như sau:

- Sơ đồ thuật toán: Sơ đồ thuật toán được trình bày trong hình 4.



Hình 4. Sơ đồ thuật toán tính toán thông số đầu vào

```python
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize

# Given regression equation
def regression_equation(x, a):
    Ui, Ton, Toff, Ws = x
    return (32.872 - 0.7074 * Ui + 1.2436 * Ton - 0.3992 * Toff + 2.1453 * Ws - a)**2

# Define the constraints
constraints = (
    {'type': 'ineq', 'fun': lambda x: x[0] - 50},  # Ui >= 50
    {'type': 'ineq', 'fun': lambda x: 70 - x[0]},  # Ui <= 70
    {'type': 'ineq', 'fun': lambda x: x[1] - 2},   # Ton >= 2
    {'type': 'ineq', 'fun': lambda x: 8 - x[1]},   # Ton <= 8
    {'type': 'ineq', 'fun': lambda x: x[2] - 4},   # Toff >= 4
    {'type': 'ineq', 'fun': lambda x: 12 - x[2]},  # Toff <= 12
    {'type': 'ineq', 'fun': lambda x: x[3] - 6},   # Ws >= 6
    {'type': 'ineq', 'fun': lambda x: 10 - x[3]}   # Ws <= 10
)

# Define the bounds
bounds = [(50, 70), (2, 8), (4, 12), (6, 10)]

# Initial guess
x0 = [60, 5, 8, 8]

# Desired value of Y
a = 20  # Replace with the specific value of Y

# Perform the minimization
try:
    result = minimize(regression_equation, x0, args=(a,), constraints=constraints, bounds=bounds)
    if result.success:
        print("Optimal solution found:")
        print("Ui:", result.x[0])
        print("Ton:", result.x[1])
        print("Toff:", result.x[2])
        print("Ws:", result.x[3])
    else:
        print("No solution found")
        print("Reason:", result.message)
except Exception as e:
    print("An error occurred:", str(e))
```

Hình 5. Chương trình Python để tính toán các thông số đầu vào

Dựa trên sơ đồ thuật toán trình bày trong hình 4, tạo chương trình Python để tính toán các thông số công nghệ đầu vào như trình bày trong hình 5.

- Chương trình tính toán trong hình 5 cung cấp các kết quả sau:

+ U_i = 54,37749135919918 (V);
+ T_{on} = 6,6867519757461835 (µs);
+ T_{off} = 5,750996437308077 (µs);
+ W_s = 9,124500200086356 (m/s).

- Chọn các thông số công nghệ thực tế trên máy:

+ U_i = 50 (V);
+ T_{on} = 7 (µs);
+ T_{off} = 6 (µs);
+ W_s = 9 (m/s).

- Sai số tính toán theo phương trình hồi quy (1):

$$Y_c = Y_{(50,\,7,\,6,\,9)} = 32{,}86\ (\mu m)$$

- Tiến hành gia công với tất cả các điều kiện tương tự như các điều kiện thực nghiệm ban đầu. Kết quả đo cho thấy độ chính xác kích thước với sai số là Y_R = 33 (µm).

Nhận xét: Việc xác thực cho thấy $Y_R \approx Y_C$, do đó phương trình hồi quy đảm bảo độ chính xác cao trong thực tế.

4. KẾT LUẬN

- Tiến hành gia công thực nghiệm thép gió SKH51 trên máy cắt dây EDM VL600Q bằng điện cực dây đồng, kết quả nghiên cứu đã thiết lập phương trình hồi quy (1) với mức độ dự đoán độ chính xác kích thước là 99,47% từ các thông số công nghệ đầu vào.

- Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy rằng bốn thông số công nghệ ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác kích thước của chi tiết bao gồm điện áp kích là thông số quan trọng nhất (U_i – mức độ ảnh hưởng là 65,13%), tiếp theo là tốc độ dây (W_s – mức độ ảnh hưởng là 19,75%), thời gian phóng điện (T_{on} – mức độ ảnh hưởng là 11,45%), và cuối cùng là thời gian ngắt xung (T_{off} – mức độ ảnh hưởng là 3,68%).

- Nội dung của bài báo này cũng trình bày một chương trình Python để tính toán bộ bốn thông số công nghệ (U_i, T_{on}, T_{off}, W_s) khi sai số kích thước gia công được xác định.

- Những kết quả nghiên cứu này phục vụ như một tài liệu tham khảo cho việc xác định các thông số công nghệ khi sử dụng máy cắt dây EDM.❖ ☞

Ngày nhận bài: **10/6/2024**
Ngày phản biện: **18/6/2024**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Vũ Hoài Ân (2003); *Gia công tia lửa điện.* NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.

[2]. Trần Quốc Hùng, Nguyễn Quốc Dũng (2020); *Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến độ chính xác kích thước và độ không tròn của bề mặt lỗ khi gia công thép SKD1 trên máy gia công tia lửa điện sử dụng điện cực dây bằng đồng*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Tập 56, Số 5, trang 60-63.

[3]. Muhammad Umar Farooq, Muhammad Asad Ali, Saqib Anwar & Haider Ali Bhatti (2023). *Process parameters optimization and performance analysis of micro-complex geometry machining on Ti6Al4V*, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM).

[4]. Sameh Habib (2017). *Optimization of machining parameters and wire vibration in wire electrical discharge machining process,* Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes, Vol. 3, No. 3, pp. 1-9.

[5]. Trần Văn Địch, Ngô Trí Phúc (2006); *Sổ tay thép thế giới.* NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.

[6]. Douglas C. Montgomery (2017). *Design and Analysis of Experiments*, Arizona State University.