

THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH BỘ THÔNG SỐ TỐI ƯU GIA CÔNG CẮT DÂY BÁNH RĂNG TRỤ NGOÀI RĂNG THẲNG BẰNG VẬT LIỆU THÉP C45

EXPERIENCE TO DETERMINATE THE OPTIMIZED SET OF PARAMETERS WHEN WIRE-EDM MACHINING EXTERNAL SPUR GEARS STRAIGHT TEETH C45 STEEL

Trần Hữu Danh

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

TÓM TẮT

Mục đích của nghiên cứu này là tìm ra bộ thông số EDM tối ưu có thể tối đa hóa chất lượng và độ chính xác của gia công bánh răng hình trụ bên cạnh răng thẳng làm bằng vật liệu thép C45. Ba thông số chính là Tốc độ di chuyển trục chính n (mm/s), Hệ số ngắn mạch s (mm), Bù dây f (mm) đã được nghiên cứu bằng phương pháp Box-Behnken. Phân tích phương sai đã được áp dụng để tìm ra tác động đáng kể của các thông số EDM, cho thấy n và s có ảnh hưởng nhiều nhất đến độ nhám bề mặt (R_z), trong khi f có ảnh hưởng nhiều nhất đến Đường kính vòng đỉnh (D) của răng bằng cách sử dụng mô-đun Responce Optimizer của phần mềm Minitab để tiến hành xác định độ nhám tối thiểu ($R_{a_{min}}$) và đường kính vòng cực đại tối đa (D_{max}) của bánh răng, từ đó cung cấp bộ thông số tối ưu để đánh giá sau khi gia công là đáng tin cậy và có thể được mở rộng sang thực hành gia công EDM cho các loại chi tiết khác nhau.

Từ khóa: Máy cắt dây; Bánh răng; C45; Phương pháp Box-Behnken; Độ nhám bề mặt.

ABSTRACT

The aim of this research is to find the optimal set of EDM parameters that can maximize the quality and precision of machining cylindrical gears in addition to straight teeth made of C45 steel material. The three main parameters namely Spindle Movement Speed n (mm/s), Short circuit coefficient s (mm), Wire compensation f (mm) were investigated using the Box-Behnken method. Variance analysis was applied to find the significant impact of EDM parameters, showing that n and s had the most influence on surface roughness (R_z), while f had the most influence on the Peak Ring Diameter (D) of teeth using the Responce Optimizer module of Minitab software to conduct the determination of minimum roughness ($R_{a_{min}}$) and peak ring diameter maximum (D_{max}) of gears, thereby providing the optimal set of parameters for evaluation after machining is reliable and can be extended to EDM processing practice for different types of parts.

Keywords: WEDM; Surface Roughness; Box-Behnken method; C45.

1. GIỚI THIỆU

Thép C45 là loại thép hợp kim cacbon cao có độ cứng và độ bền kéo thích hợp cho việc chế tạo khuôn, ứng dụng trong cơ khí, các bộ phận chịu tải trọng cao và va đập mạnh. Trong lịch sử, việc gia công bánh răng hình trụ bên ngoài răng thẳng bằng vật liệu thép C45 thường sử dụng các phương pháp gia công truyền thống như tạo hình phay được thực hiện bằng dao phay tạo hình có profin phù hợp với profin của răng răng. Hiện nay, với sự phát triển của khoa học công nghệ, ngoài các phương pháp gia công truyền thống như trên, các phương pháp gia công phi truyền thống như máy cắt dây điện (EDM) [1] được sử dụng để gia công nhiều dạng bề mặt phức tạp với độ chính xác cao như lỗ hình, đặc biệt là các khe hẹp có vòng cung cong, gia công lỗ trong khuôn đục lỗ, khuôn ép kim loại, gia công điện cực cho máy xung EDM, dùng để cắt các đường viền phức tạp như cấu hình cam, cấu hình thân bánh răng, cấu hình spline, cắt mặt ba chiều, chẳng hạn

như bề mặt bánh răng nghiêng, cánh tua-bin, khối hình nón, chi tiết xoắn ốc, parabol... [5] từ đó nâng cao năng suất, chất lượng và hiệu quả của sản phẩm. Do đó, việc ứng dụng công nghệ EDM để gia công bánh răng hình trụ ngoài răng thẳng bằng vật liệu thép C45 xác định các thông số công nghệ tối ưu khi gia công thép để gia công bánh răng hình trụ ngoài răng thẳng bằng vật liệu thép C45 có ý nghĩa khoa học và thực tiễn. Trong nghiên cứu này, ba thông số đầu vào đã được tính đến. Sử dụng phương pháp Box-Behnken, tìm bộ tham số tối ưu cho độ nhám bề mặt và hồ sơ chi tiết.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Mẫu thí nghiệm

Đối với thí nghiệm, lựa chọn thép C45 có hàm lượng carbon cao, có nhiều ứng dụng trong lĩnh vực cơ khí chế tạo, có khả năng chịu lực và kéo tốt. Thành phần hóa học của thép được thể hiện chi tiết trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học của thép C45

	Thành phần hóa học						
Thép	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
C45	0.42~0.5	0.17~0.37	0.5~0.8	0.04	≤0.04	≤0.25	≤0.25

2.2. Thiết bị thí nghiệm và dụng cụ đo

Trong nghiên cứu này, thiết bị cắt dây DW35 là thiết bị xử lý xung điện, trong đó điện cực âm trên máy là dây kim loại có đường kính 0.1-0.3mm. Đây là sự khác biệt cơ bản giữa máy cắt dây tia lửa và các máy xử lý xung khác, đạt được độ chính xác rất cao khi gia công (Hình 1).



Hình 1. Thiết bị máy cắt dây DW35





a) Thiết bị đo tọa độ Benchmark 5.4.4



b) Thiết bị đo độ nhám Mitutoyo SJ-210
Hình 2. Thiết bị kiểm tra

Sử dụng dụng cụ đo tọa độ Benchmark 5.4.4 CMM để kiểm tra biên dạng hình học của chi tiết (Hình 2a). Thiết bị đo độ nhám Mitutoyo SJ-210 để kiểm tra độ nhám bề mặt chi tiết (Hình 2b).

2.3. Thiết kế thí nghiệm

Mục đích của nghiên cứu này là dựa trên công suất máy, vật liệu cắt và dây cắt, chọn ba thông số đầu vào tương ứng: Tốc độ di chuyển trục chính (n), hệ số ngắn mạch (S), bù dây (f) để khảo sát chất lượng độ nhám bề mặt và biên dạng chi tiết [1-4]. Bố cục của ma trận thực nghiệm như Bảng 2.

Bảng 2. Thông số đầu vào và các mức được điều tra.

Thông số đầu vào	Ký hiệu		Giá trị biến thiết kế		
	Tự nhiên	Mã hoá	Mức (-1)	Mức (0)	Mức (+1)
Tốc độ di chuyển trục chính	n (mm/s)	A	100	125	150
Hệ số ngắn mạch	S (mm)	B	8	9	10
Bù dây	f (mm)	C	0.1	0.11	0.12

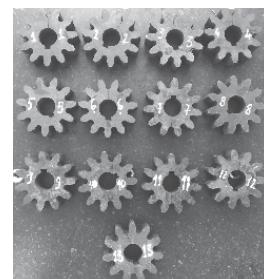
2.4. Thí nghiệm

Sử dụng quy hoạch bậc hai Box-Behnken ba yếu tố có thể mô tả tốt các tính chất của đối tượng nghiên cứu trong không gian thiết kế với quy hoạch bậc hai, phương trình hồi quy có dạng bậc hai [7], vì vậy có thể tối ưu hóa để tìm các tham số công nghệ phù hợp để có được các tham số đầu ra tốt nhất với phương trình hồi quy đa thức có dạng chung là công thức (1):

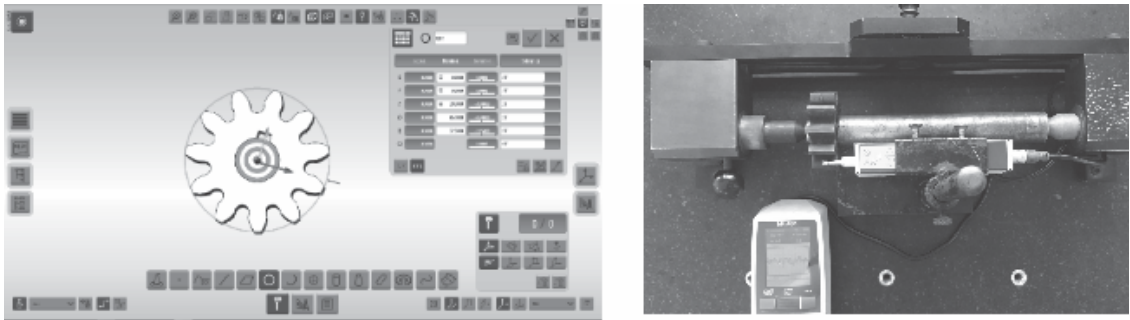
$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Trong đó, các thông số đầu ra lần đầu

tiên được nghiên cứu là độ nhám (Ra) bề mặt và biên dạng chi tiết (D). Ma trận lập kế hoạch ở dạng tự nhiên và giá trị trung bình của ba phép đo và thử nghiệm (hình 4) sau khi gia công (hình 3) được thể hiện trong Bảng 3.



Hình 3. Sản phẩm sau khi gia công theo ma trận thí nghiệm



Hình 4. Đo kiểm sản phẩm sau khi cắt dây DW35

Bảng 3. Thông số đầu vào và kết quả đầu ra

No	n	S	f	Độ nhám Ra	Đường kính vòng đỉnh (D)
1	100	8	0.11	2.542	64.9286
2	150	8	0.11	2.488	64.9443
3	100	10	0.11	2.545	64.9368
4	150	10	0.11	2.789	64.9434
5	100	9	0.1	2.613	64.9118
6	150	9	0.1	2.819	64.9971
7	100	9	0.12	2.977	65.0306
8	150	9	0.12	2.960	64.9676
9	125	8	0.1	2.548	64.9010
10	125	10	0.1	2.820	64.8999
11	125	8	0.12	2.911	64.9410
12	125	10	0.12	2.943	64.9494
13	125	9	0.11	2.371	65.0552
14	125	9	0.11	2.371	65.0552
15	125	9	0.11	2.371	65.0552



3. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

3.1. Độ nhám bề mặt Ra

Sử dụng phần mềm Minitab, tính toán phương trình hồi quy ở dạng tổng quát chung được hiển thị trong bảng 4.

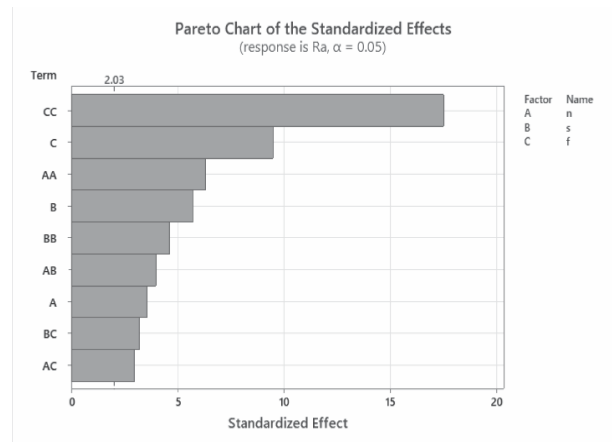
Bảng 4. Các hệ số của phương trình hồi quy hoàn chỉnh của độ nhám

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	2.3110	0.0217	106.73	0.000
n	0.0474	0.0133	3.57	0.001
s	0.0760	0.0133	5.73	0.000
f	0.1255	0.0133	9.47	0.000
n*n	0.1234	0.0195	6.32	0.000
s*s	0.0900	0.0195	4.61	0.000
f*f	0.3412	0.0195	17.48	0.000
n*s	0.0745	0.0188	3.97	0.000
n*f	0.0557	0.0188	-2.97	0.005
s*f	0.0600	0.0188	-3.20	0.003

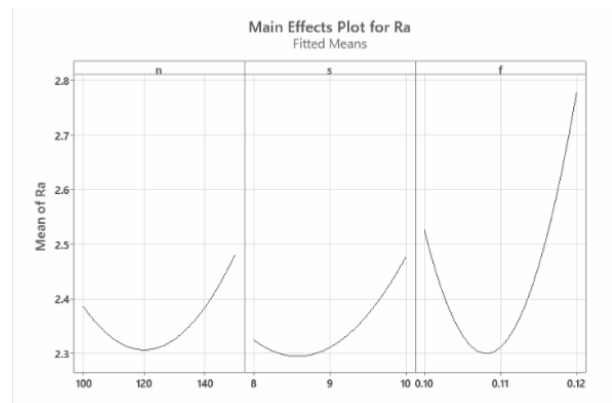
Phương trình hồi quy đặc trưng cho ảnh hưởng của các tham số đầu vào đến độ nhám bề mặt:

$$Ra = 46.01 - 0.0497 n - 1.256 s - 656.2 f + 0.000197 n^2 + 0.0900 s^2 + 3412 f^2 + 0.002980 ns - 0.2230 nf - 6.00 sf \quad (2)$$

Phân tích các hệ số có ảnh hưởng nhiều nhất đến phương trình hồi quy vừa tìm thấy. Dựa trên sơ đồ Pareto (Hình 5), tìm thấy các hệ số ảnh hưởng nhiều nhất đến phương trình hồi quy: Tương tác bậc 2 bù dây; bù dây; tương tác bậc 2 tốc độ di chuyển trục chính.



Hình 5. Biểu đồ Pareto thể hiện mức độ ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt



Hình 6. Kết quả phân tích ảnh hưởng các thông số đến độ nhám bề mặt

Từ biểu đồ (Hình 6) cho thấy ảnh hưởng của hai thông số đầu vào ảnh hưởng nhiều nhất đến độ nhám bề mặt, đó là hệ số bù dây ảnh hưởng nhiều nhất đến độ nhám bề mặt của chi tiết bánh răng. Cũng từ biểu đồ, ta thấy rằng khi tăng tốc độ di chuyển trục chính từ mức (-1), độ nhám giảm từ giá trị 2.4 về mức cực tiểu 2.3 tại vùng cận mức tâm (0), sau đó tăng tới giá trị lớn nhất là 2.5; khi tăng hệ số đoạn mạch từ mức (-1), độ nhám giảm từ giá trị 2.35 về mức cực tiểu 2.3 tại vùng cận mức tâm (0), sau đó tăng tới giá trị lớn nhất là 2.5; khi tăng giá trị bù dây từ mức (-1), độ nhám giảm từ giá trị 2.5 về mức cực tiểu 2.3 tại vùng cận mức tâm (0), sau đó tăng tới giá trị lớn nhất là 2.8.

3.2. Đường kính vòng đỉnh D

Sử dụng phần mềm Minitab, tính toán phương trình hồi quy ở dạng tổng quát chung cho đường kính vòng đỉnh được hiển thị trong bảng 5.

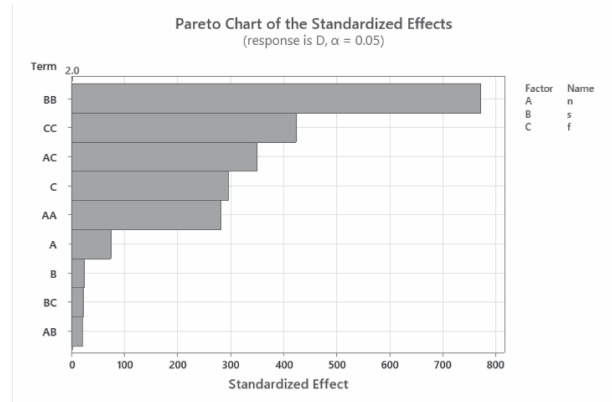
Bảng 5. Các hệ số của phương trình hồi quy hoàn chỉnh của đường kính vòng đỉnh

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	65.0546	0.0001	530327.73	0.000
n	0.005575	0.000075	74.22	0.000
s	0.001825	0.000075	24.29	0.000
f	0.022225	0.000075	295.86	0.000
n*n	-0.031113	0.000111	-281.38	0.000
s*s	-0.085312	0.000111	-771.56	0.000
f*f	-0.046812	0.000111	-423.37	0.000
n*s	-0.002275	0.000106	-21.41	0.000
n*f	-0.037075	0.000106	-348.99	0.000
s*f	0.002375	0.000106	22.36	0.000

Phương trình hồi quy đặc trưng cho ảnh hưởng của các tham số đầu vào đến đường kính vòng đỉnh bánh răng:

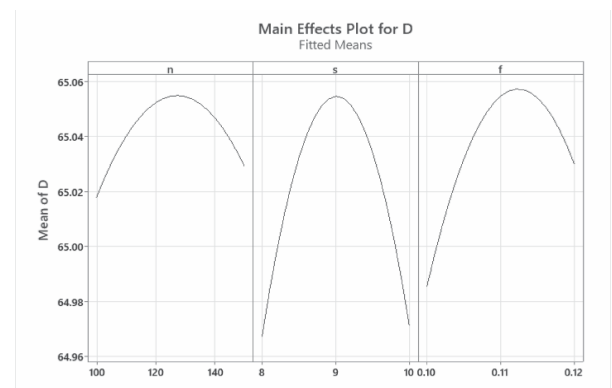
$$D = 49.5070 + 0.029800 n + 1.52270 s + 121.610 f - 0.000050 n*n - 0.085312 s*s - 468.12 f*f - 0.000091 n*s - 0.148300 n*f + 0.2375 s*f \quad (3)$$

Phân tích các hệ số có ảnh hưởng nhiều nhất đến phương trình hồi quy vừa tìm thấy. Dựa trên sơ đồ Pareto (Hình 7), tìm thấy các hệ số ảnh hưởng nhiều nhất đến sai lệch đường kính đỉnh D: Tương tác bậc 2 của hệ số đoạn mạch; tương tác bậc 2 của bù dây.



Hình 7. Biểu đồ Pareto thể hiện mức độ ảnh hưởng đến đường kính vòng đỉnh

Từ đồ thị (Hình 8) cho thấy ảnh hưởng của các tham số đầu vào ảnh hưởng nhiều nhất đến đường kính vòng đỉnh, cụ thể là Tốc độ di chuyển ảnh hưởng nhiều nhất đến đường kính vòng đỉnh của bánh răng. Qua đồ thị, ta thấy rằng khi tăng tốc độ di chuyển trục chính từ mức (-1), đường kính vòng đỉnh của bánh răng tăng từ giá trị thấp nhất và đạt giá trị lớn nhất ở vùng tâm quy hoạch, sau đó giảm dần; khi tăng hệ số đoạn mạch từ mức (-1), đường kính vòng đỉnh của bánh răng tăng từ giá trị thấp nhất và đạt giá trị lớn nhất ở vùng tâm quy hoạch, sau đó giảm dần; thấy rằng khi tăng bù dây từ mức (-1), đường kính vòng đỉnh của bánh răng tăng từ giá trị thấp nhất và đạt giá trị lớn nhất ở vùng tâm quy hoạch, sau đó giảm dần.



Hình 8. Kết quả phân tích ảnh hưởng các thông số đến đường kính vòng đỉnh

3.3. Tối ưu thông số

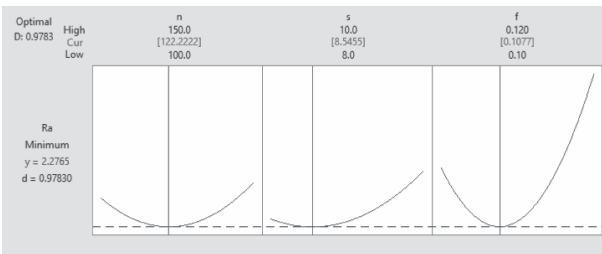
3.3.1. Tối ưu độ nhám Ra

Tối ưu hóa các thông số độ nhám bề mặt Ra, sử dụng phần mềm Minitab để tiến hành xác định độ nhám bề mặt tối thiểu (Ra_{min}) có thể đạt được bằng 6.

Bảng 6. Bảng thông số đầu vào của độ nhám bề mặt

Solution	n	s	f	Ra Fit
1	122.222	8.54545	0.107677	2.27654

Kết quả có giá trị 0,978299, kết luận là hoàn toàn phù hợp với các điều kiện đầu vào.



Hình 9. Biểu đồ hiển thị các tham số đầu vào cho Ra

Độ nhám bề mặt đạt giá trị cực tiểu ở các giá trị tham số đầu vào là:

Thông số đầu vào	Giá trị
n	122.222
s	8.54545
f	0.107677

Với bộ giá trị tham số tối ưu cho kết quả giá trị tối thiểu của độ nhám bề mặt được tạo thành dự đoán là: 2,27654 μ m.

3.3.2. Tối ưu hóa đường kính vòng đỉnh D

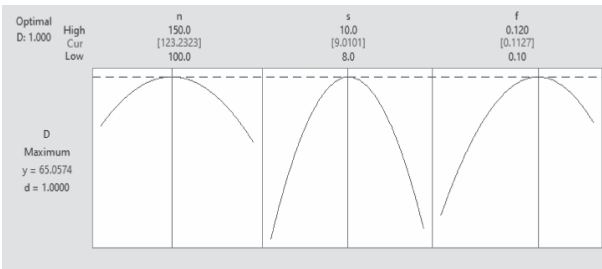
Sử dụng phần mềm Minitab tối ưu hóa

bộ thông số cho đường kính đỉnh D với đường kính vòng đỉnh tối đa có thể đạt được (D_{max}) Bảng 7.

Bảng 7. Bảng thông số đầu vào của đường kính vòng đỉnh

Solution	n	s	f	D Fit
1	123.232	9.01010	0.112727	65.0574

Kết quả có giá trị là 1 kết luận hoàn toàn phù hợp với điều kiện đầu vào.



Hình 10. Sơ đồ biểu thị các tham số đầu vào cho đường kính vòng đỉnh D

Kết luận rằng đường kính vòng đỉnh đạt giá trị tối đa ở các giá trị tham số đầu vào là:

Thông số đầu vào	Giá trị
n	123.232
s	9.0101
f	0.112727

Với bộ thông số tối ưu, giá trị tối đa của đường kính vòng cực đại của bánh răng được hình thành được dự đoán là: 65.0574 mm.

3.3.3. Tối ưu hóa bộ thông số ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt Ra và đường kính vòng đỉnh D

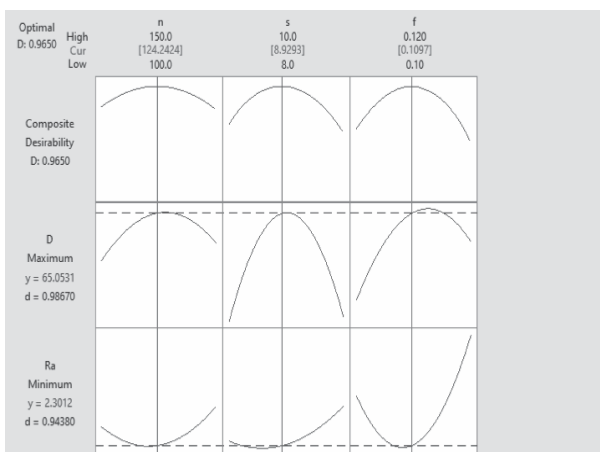
Sử dụng phần mềm Minitab, tối ưu hóa hai bộ thông số Ra và D với điều kiện đầu vào là độ nhám tối thiểu (Ra) và đường kính tối đa (D) của bánh răng. Sau khi thiết lập tính toán,

nhận được bảng giá trị tham số đầu vào như Bảng 8.

Bảng 8. Bảng giá trị thông số đầu vào Ra và D

Solution	n	s	f	D Fit	Ra Fit
1	124.242	8.92929	0.109697	65.0531	2.30124

Kết quả có giá trị 0,965012, hoàn toàn phù hợp với các điều kiện đầu vào.



Hình 11. Đồ thị các thông số đầu vào ảnh hưởng đến độ nhám và đường kính bánh răng

Kết luận rằng kết quả tối ưu hoá đa mục tiêu giá trị cực đại đường kính vòng đỉnh tạo thành và cực tiểu độ nhám bề mặt chi tiết tạo thành có các giá trị thông số đầu vào là:

Thông số đầu vào	Giá trị			
n	124.242			
s	8.92929			
f	0.109697			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
D	65.0531	0.0001	(65.0529, 65.0534)	(65.0523, 65.0539)
Ra	2.3012	0.0216	(2.2574, 2.3451)	(2.1623, 2.4402)

Với kết quả phản hồi là 95%, bộ tham số $n = 124 \text{ mm/s}$; $s = 9$; $f = 0,11 \text{ mm}$ là chế độ cắt tối ưu cho thiết bị khi gia công thép C45.

4. KẾT LUẬN

Kết quả thu được từ bài báo xác định rằng $n = 122,22 \text{ (mm/s)}$ và $s = 8,54545 \text{ (mm)}$ có ảnh hưởng nhiều nhất đến độ nhám bề mặt (Ra) và đạt giá trị tối thiểu $Ra_{\min} = 2,27654 \text{ (}\mu\text{m)}$, trong khi $f = 0,112727 \text{ (mm)}$ ảnh hưởng nhiều nhất đến Đường kính vòng đỉnh (D) và đạt giá trị tối đa $D_{\max} = 65,0574 \text{ (mm)}$. Phân tích tổng hợp cho thấy giá trị tối đa của đường kính tối đa của vòng đỉnh hình thành và giá trị tối thiểu của độ nhám bề mặt được hình thành có các giá trị tham số đầu vào là: $n = 124 \text{ (mm/s)}$; $s = 9 \text{ (mm)}$; $f = 0,11 \text{ (mm)}$ là chế độ cắt tối ưu để gia công thép C45. Với bộ thông số tối ưu này có thể làm cơ sở cho những công trình nghiên cứu tiếp theo, cũng nhằm mục đích gia công các chi tiết, cơ cấu máy bằng thép C45 khác và có thể mở rộng sang gia công cắt dây cho các loại chi tiết khác nhau với các loại vật liệu khác nhau.

Lời cảm ơn:

Tác giả xin chân thành cảm ơn Ban Giám hiệu Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long và Ban Biên tập Tạp chí Cơ khí Việt Nam đã tạo điều kiện để tác giả tham gia bài báo. ❖

Ngày nhận bài: 12/4/2024

Ngày phản biện: 25/5/2024

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Tran Huu Danh, Nguyen Hong Linh, Bui Thanh Danh, Pham Duc Lam, Nguyen Anh Tuan, Hoang Xuan Tu, and Nguyen Dinh Ngoc, *Studying the Impacts of Dressing Parameters on the Surface Roughness and* 

- Material Removal Rate when Wire-EDM curve profile of hardened SKD11 steel*, ICERA 2022.
- [2]. Trieu Quy Huy, Tran Huu Danh, Bui Thanh Danh, Nguyen Van Cuong, Tran Quoc Hoang, Nguyen Manh Cuong, and Nguyen Thanh Tu, *Multi-Criteria Decision Making in wire-EDM Process Using MARCOS Method*, ICERA 2022.
- [3]. Nguyen Anh Tuan, Nguyen Hong Linh, Tran Huu Danh, Nguyen Huu Luan, Bui Thanh Danh, Do Thi Tam, Nguyen Thi Quoc Dung, and Nguyen Dinh Ngoc*, *Influence of WEDM Process Parameters on Material Removal Rate when Machining Circular Profile of Hardened SKD11 Steel*, ICERA 2022.
- [4]. Nguyen Hong Linh, Bui Thanh Danh, Pham Duc Lam, Tran Huu Danh, Nguyen Huu Quang, Nguyen Thanh Tu, and Do Thi Tam*, *Effect of Input Factors on Material Removal Speed in Electrical Discharge Machining SKD11 Tool Steel*, ICERA 2022.
- [5]. Pradhan, M.K. and C.K. Biswas, *Modelling of machining parameters for MRR in EDM using response surface methodology*, 2008.
- [6]. S.L.C. Ferreira,, R.E. Bruns, H.S. Ferreira, G.D. Matos, J.M. David, G.C. Brandão, E.G.P. da Silva, L.A. Portugal, P.S. dos Reis, A.S. Souza, W.N.L. dos Santos, *Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods*.
- [7]. Nguyen Huu Loc, *Planning and Experimental Analysis*, HCMUT-VNU-HCM, 2011.