

DỰ ĐOÁN ẢNH HƯỞNG, TỐI ƯU HÓA ĐỒNG THỜI ĐỘ NHÁM BỀ MẶT VÀ NĂNG SUẤT GIA CÔNG KHI TIỆN HỢP KIM SKD 61 TRONG ĐIỀU KIỆN BÔI TRƠN TỐI THIỂU

PREDICTION AND OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS AND MATERIAL REMOVAL RATE
IN TURNING OF SKD 61 USING MINIMUM QUANTITY LUBRICATION METHOD

Hoàng Tiến Dũng¹, Phạm Văn Đông¹, Nguyễn Thành Công¹,
Nguyễn Chí Bảo¹, Nguyễn Bá Nghiễn¹, Nguyễn Văn Cảnh^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.141>

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày giải thuật mới nhằm toán tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình tiện tinh thép SKD61 trong điều kiện bôi trơn tối thiểu và ứng dụng phân tích ANOVA để dự đoán ảnh hưởng của các tham số công nghệ quá trình tiện tới độ nhám bề mặt R_a (μm) và năng suất gia công MRR ($\text{cm}^3/\text{phút}$). Nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện với thiết bị bôi trơn tối thiểu tích hợp tính năng điều khiển IoT và khả năng điều khiển thích nghi trên cơ sở dữ liệu thu thập trong quá trình thực nghiệm. Mục tiêu của nghiên cứu là tối đa hóa năng suất gia công MRR, đồng thời đảm bảo được độ nhám bề mặt sản phẩm R_a vẫn duy trì được ngưỡng yêu cầu bằng cách sử dụng thuật toán tối ưu hóa phản ứng hóa học CRO (CRO - Chemical Reaction Optimization).

Từ khóa: SKD61; MQL; IoT; CRO; ANOVA.

ABSTRACT

This study presents a new algorithm for multi-objective optimization of the SKD61 steel turning process under minimum lubrication (MQL) conditions and the application of ANOVA analysis to predict the influence of cutting parameters on surface roughness R_a (μm) and machining productivity MRR (cm^3/min) in turning of SKD 61 mould steel. The experimental research was carried out by combining the MQL-IoT system with the ability to adaptive control capabilities based on data collected during the experiment. The goal of the study is to maximize the MRR machining productivity while ensuring that the value of surface roughness R_a does not exceed the limitation by using Chemical Reaction Optimization (CRO).

Keywords: SKD61; MQL; IoT; CRO; ANOVA.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: nguyenvancanh@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 27/02/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/4/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/8/2023

1. GIỚI THIỆU

SKD61 là một loại thép hợp kim chịu nhiệt và chịu mài mòn cao được sử dụng rộng rãi trong ngành sản xuất khuôn

mẫu, khuôn ép và khuôn dập. Gia công thép hợp kim SKD61 nói chung và gia công tiện nói riêng đều gặp phải nhiều khó khăn. Đối với gia công SKD61, khó khăn chính là độ cứng và tính chịu mài mòn cao của thép, gây ra độ khó trong việc cắt và gia công. Thêm vào đó, tính chịu nhiệt của SKD61 cũng làm tăng độ khó trong quá trình gia công. Trong quá trình gia công cắt gọt nói chung và gia công tiện thép cứng SKD61 nói riêng, dầu tưới nguội thường được sử dụng bởi nhằm bôi trơn vùng gia công, giảm nhiệt cắt, đồng thời làm sạch phoi, đảm bảo chất lượng bề mặt quá trình gia công [1]. Mặc dù có vai trò to lớn trong quá trình gia công cắt gọt, nhưng dầu bôi trơn cũng mang lại những tác động tiêu cực tới môi trường, sức khỏe và cả khả năng cạnh tranh của doanh nghiệp. Theo nghiên cứu của Để giảm nhiệt trong quá trình gia công, đồng thời hỗ trợ làm sạch bề mặt gia công, nâng cao chất lượng bề mặt sản phẩm, tăng tuổi bền dụng cụ..., dầu gia công thường được sử dụng [2]. Bên cạnh những ưu điểm này, dầu gia công cũng mang lại những tác động tiêu cực tới môi trường, sức khỏe người lao động, đồng thời làm giảm tính cạnh tranh của sản phẩm gia công do chi phí sử dụng, vận hành lớn, lên tới 15% tổng chi phí sản xuất [3]. Để hạn chế những nhược điểm này, nhiều phương pháp bôi trơn-làm mát mới đã được nghiên cứu và ứng dụng trong thời gian gần đây, có thể kể đến như phương pháp gia công khô, gia công gần khô, bôi trơn tối thiểu, làm mát bằng khí Ni tơ, CO₂... trong nghiên cứu này, bôi trơn tối thiểu MQL được sử dụng bởi những ưu điểm trong gia công tinh, đặc biệt là với nhóm hợp kim, thép cứng như SKD61 [4].

Trong gia công tinh nói chung, ngoài chỉ tiêu quan trọng cần phải đạt được là độ nhám bề mặt sản phẩm R_a , các nhà sản xuất còn phải hướng tới đạt được đồng thời một trong các mục tiêu khác như giảm thiểu lực cắt, giảm thiểu năng lượng tiêu thụ, tăng tuổi bền dụng cụ, tăng năng suất gia công... Để đạt mục tiêu này, nhiều phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu như TOPSIS [5], MOORA [6]... đã được áp dụng do phương pháp tính toán đơn giản, thậm chí với bài toán

rất nhiều mục tiêu. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là tốc độ tính toán thấp, và giá trị tối ưu chỉ được lựa chọn từ một trong các bộ số liệu thực nghiệm. Do vậy, đây có thể không phải là giá trị tối ưu, mà là giá trị tốt nhất trong các bộ giá trị tham số đã triển khai.

Do sự phát triển của khoa học máy tính và toán học, nhiều thuật mới đã được giới thiệu và ứng dụng nhằm nâng cao độ tin cậy cũng như tốc độ tính toán trong xử lý các bài toán tối ưu, kết hợp với công nghệ trí tuệ nhân tạo và các thuyết tiến hóa, giúp nâng cao độ tin cậy của kết quả tính toán theo thời gian. Đây là giải pháp có ý nghĩa cao trong thực tiễn, đặc biệt khi áp dụng trong điều khiển thích nghi hoặc công nghệ kết nối vạn vật IoT, khi mà các tham số công nghệ được giám sát và điều khiển để nâng cao chất lượng sản phẩm, hiệu quả sản xuất. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng thuật toán Tối ưu hóa phản ứng hóa học (CRO - Chemical Reaction Optimization) để tối ưu hóa quá trình tiện hợp kim SKD61, với mục tiêu tối đa hóa năng suất gia công MRR, đồng thời đảm bảo độ nhám bề mặt sản phẩm sau gia công vẫn trong phạm vi cho phép.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Điều kiện thực nghiệm

Thực nghiệm được thực hiện trên trung tâm gia công Tiện phay DMG Mori Seiki CLX 350 (hình 1a).



(a) Trung tâm tiện phay CLX 350



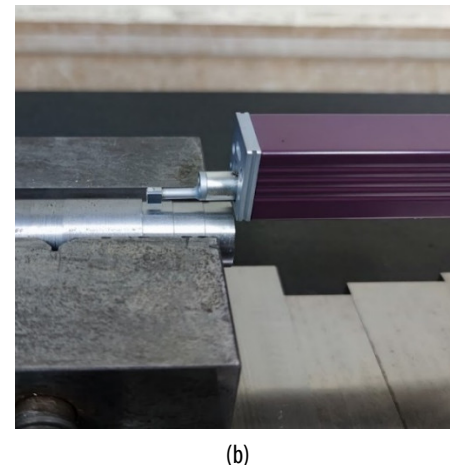
(b) Mẫu thí nghiệm thép SKD61

Hình 1. Máy và phôi thực nghiệm

Thí nghiệm sử dụng cán dao và mảnh cắt được cung cấp bởi DORMER PRAMET. Cán dao tiện kẹp vít giữ mảnh dao cắt

với 20mm (chiều cao cán dao) x 20mm (rộng) x 125mm (dài) thường được sử dụng để tiện dọc bên ngoài (hình 2a).

Mảnh cắt DCMT 11T304E-UR:T8330, hình thoi 55° với khe hở 7°, đường kính vòng tròn nội tiếp 9,525mm, dày 3,97mm, bán kính mũi 0,4mm. Vật liệu mảnh cắt là HKC một cacbua WC-Co hạt mịn được phủ PVD ứng dụng để gia công thép, thép không gỉ và gang từ tinh đến thô.



Hình 2. (a) Dụng cụ cắt và (b) Máy đo nhám Mitutoyo JS-201

Trong nghiên cứu này, giá trị độ nhám của mỗi phôi sau thực nghiệm được đo 3 lần trên máy đo nhám JS-201 của hãng Mitutoyo (hình 2b). Giá trị năng suất cắt cho mỗi thực nghiệm được tính toán dựa trên giá trị về V_c , f_v , a_p . Kết quả thực nghiệm được thu thập và trình bày như bảng 2.

2.2. Triển khai thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, 5 tham số công nghệ của quá trình gia công tiện được khảo sát là vận tốc cắt V_c (m/ph), chiều sâu cắt a_p (μm) và lượng chạy dao vòng f_v (mm/vòng) với các khoảng giá trị tương ứng được lựa chọn trên cơ sở kế thừa các nghiên cứu tương tự và khuyến nghị từ nhà sản xuất dụng cụ cắt; Tham số công nghệ bôi trơn tối thiểu được khảo sát là Áp suất đầu vào của dòng khí P (MPa) và lưu lượng dầu bôi trơn Q (ml/giờ), với khoảng giá trị khảo sát được lựa chọn trên cơ sở kế thừa các nghiên cứu tương tự và điều kiện thực hiện tại đơn vị. Khoảng giá trị của các biến được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Tham số công nghệ được khảo sát và khoảng giá trị tương ứng

Biến	Đơn vị	Mô tả	Mức 1	Mức 2	Mức 3
P	MPa	Áp suất khí	1,5	4	6,5
Q	ml/giờ	Lưu lượng	50	100	150
a_p	μm	Chiều sâu cắt	100	300	500
V_c	m/ph	Vận tốc cắt	100	130	160
f_v	mm/vòng	Lượng chạy dao vòng	0,05	0,1	0,15

Với số biến khảo sát là 5, số mức của mỗi biến là 3 (cao - trung bình - thấp), nhóm nghiên cứu chọn ma trận thực nghiệm Taguchi $L_{27} (3^5)$ để tiến hành khảo sát ảnh hưởng của các nhóm tham số công nghệ cắt gọt bao gồm vận tốc cắt V_c (m/phút), chiều sâu cắt a_p (mm), lượng chạy dao răng f_v (mm/răng) và tham số bôi trơn tối thiểu là áp suất nguồn khí làm mát P (MPa), lưu lượng dầu bôi trơn Q (mm/giờ) tới độ nhám bề mặt R_a (μm) và năng suất cắt gọt MRR ($\text{cm}^3/\text{phút}$).

Bảng 2. Tổng hợp kết quả thực nghiệm

STT	Lưu lượng Q (ml/giờ)	Áp suất P (kgF/cm ²)	Vận tốc cắt V_c (m/phút)	Lượng chạy dao f_v (mm/vòng)	Chiều sâu cắt a_p (μm)	Độ nhám R_a (μm)	Năng suất cắt MRR (cm^3/ph)
1	50	1,5	100	0,05	100	0,9313	0,5
2	50	1,5	100	0,05	300	0,9793	1,5
3	50	1,5	100	0,05	500	1,0320	2,5
4	50	4	130	0,1	100	0,9517	1,3
5	50	4	130	0,1	300	0,9747	3,9
6	50	4	130	0,1	500	1,0253	6,5
7	50	6,5	160	0,15	100	1,1490	2,4
8	50	6,5	160	0,15	300	1,1953	7,2
9	50	6,5	160	0,15	500	1,2795	12
10	100	1,5	130	0,15	100	1,3833	1,95
11	100	1,5	130	0,15	300	1,3805	5,85
12	100	1,5	130	0,15	500	1,5620	9,75
13	100	4	160	0,05	100	0,1620	0,8
14	100	4	160	0,05	300	0,9335	2,4
15	100	4	160	0,05	500	1,0620	4
16	100	6,5	100	0,1	100	0,4770	1
17	100	6,5	100	0,1	300	0,4683	3
18	100	6,5	100	0,1	500	0,5660	5
19	150	1,5	160	0,1	100	0,5390	1,6
20	150	1,5	160	0,1	300	0,5050	4,8
21	150	1,5	160	0,1	500	0,7715	8
22	150	4	100	0,15	100	1,2185	1,5
23	150	4	100	0,15	300	1,2363	4,5
24	150	4	100	0,15	500	1,2645	7,5
25	150	6,5	130	0,05	100	0,2393	0,65
26	150	6,5	130	0,05	300	0,3503	1,95
27	150	6,5	130	0,05	500	1,4003	3,25

3. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH

3.1. Phân tích ảnh hưởng của các tham số công nghệ tới độ nhám bề mặt

Dữ liệu độ nhám của 27 thí nghiệm được phân tích để thấy được ảnh hưởng của chế độ cắt và các thông số của chế độ bôi trơn tối thiểu đến độ nhám bề mặt trong quá trình gia công vật liệu thép SKD61. Phân tích ANOVA cho thấy mối liên hệ giữa các thông số công nghệ quá trình tiện và tham số bôi trơn tối thiểu tới độ nhám bề mặt sản phẩm, được trình bày trong bảng 3.

Bảng 3. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ nhám bề mặt

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	12	3,53156	90,26%	3,53156	0,294297	10,81	0
Q	1	0,22074	5,64%	0,00%	0,000002	0	0,994
P	1	0,21317	5,45%	52,60%	0,525999	19,33	0,001
V_c	1	0,01846	0,47%	0,35%	0,003507	0,13	0,725
f_v	1	1,16476	29,77%	53,13%	0,531249	19,52	0,001
a_p	1	0,4711	12,04%	1,82%	0,018154	0,67	0,428
Q*P	1	0,74451	19,03%	16,32%	0,16315	6	0,028
Q* V_c	1	0,12379	3,16%	4,42%	0,044242	1,63	0,223
Q* a_p	1	0,10729	2,74%	10,73%	0,107289	3,94	0,067
P* V_c	1	0,04496	1,15%	4,50%	0,044956	1,65	0,22
P* a_p	1	0,06288	1,61%	6,29%	0,062882	2,31	0,151
V_c * a_p	1	0,08795	2,25%	8,80%	0,087951	3,23	0,094
f_v * a_p	1	0,27195	6,95%	27,20%	0,271954	9,99	0,007
Error	14	0,38097	9,74%	38,10%	0,027212		
Total	26	3,91254	100,00%				
Model Summary							
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)			
0,164962	90,26%	81,92%	1,64275	58,01%			

Kết quả phân tích ở bảng này chỉ ra rằng: lượng tiến dao f_v là thông số đơn ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhám bề mặt chi tiết sau khi gia công (29,77%), cùng với đó ảnh hưởng của chiều sâu cắt a_p chiếm 12,04%, ảnh hưởng của tác động chéo giữa lưu lượng phun và áp suất phun là 19,03% (Q*P). Ngoài ra ảnh hưởng của các thông số của chế độ bôi trơn tối thiểu lần lượt là 5,64% (lưu lượng phun Q) và 5,45% (áp suất phun P), tác động chéo giữa lượng tiến dao và chiều sâu cắt (f_v * a_p) đạt 6,95%. Cùng với đó là các ảnh hưởng tác động chéo giữa các thông số có ảnh hưởng không đáng kể đến độ nhám của chi tiết. Ảnh hưởng của các thông số khác ít hơn hoặc không đáng kể được tính toán trong bảng phân tích hồi quy.

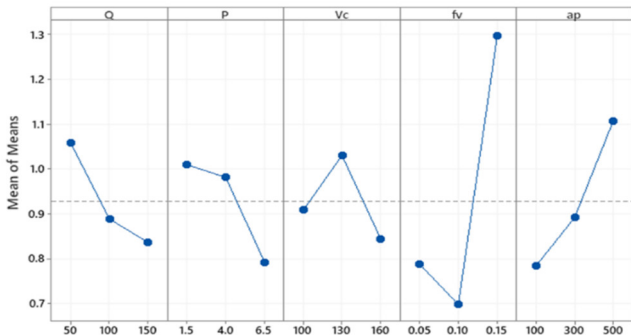
Dữ liệu phân tích chỉ ra rằng, khi khảo sát về chế độ cắt, thì lượng chiều sâu cắt a_p là thông số có mức độ ảnh hưởng ít nhất tới độ nhám bề mặt gia công, lượng tiến dao f_v và lưu lượng phun Q là 2 yếu tố ảnh hưởng lớn nhất tới độ nhám khi thay đổi qua các mức.

Bảng 4. Mức độ ảnh hưởng của các tham số tới độ nhám bề mặt

Level	Q	P	V _c	f _v	a _p
1	1,0576	1,0093	0,9081	0,7878	0,7835
2	0,8883	0,9809	1,0297	0,6976	0,8915
3	0,8361	0,7917	0,8441	1,2966	1,107
Delta	0,2215	0,2176	0,1856	0,5989	0,3236
Rank	3	4	5	1	2

Đối với các thông số chế độ cắt, từ hình 3 cho thấy ảnh hưởng lớn nhất thuộc về lượng tiến dao vòng f_v, khi điều chỉnh f_v từ mức 2 (0,1mm) tới mức 3 (0,15 mm) thì độ nhám bề mặt đã có sự tăng mạnh từ 0,8 μm lên đến 1,1 μm.

Xếp sau f_v về mức độ ảnh hưởng tới độ nhám bề mặt là chiều sâu cắt a_p, một trong các thông số của chế độ cắt, độ nhám bề mặt đã tăng một khoảng xấp xỉ 0,3μm trong quá trình thay đổi các mức của chiều sâu cắt a_p. Một thông số khác khiến cho độ nhám bề mặt có xu hướng giảm là lưu lượng phun Q, với độ nhám đạt 1,0μm ở mức 1 (50ml/giờ) và giảm xuống còn 0,8μm ở mức 3 (150ml/giờ). Trong khi đó, vận tốc cắt V_c khiến độ nhám bề mặt giữ ở giá trị quanh mức trung bình (0,92μm) khi thay đổi qua các mức.



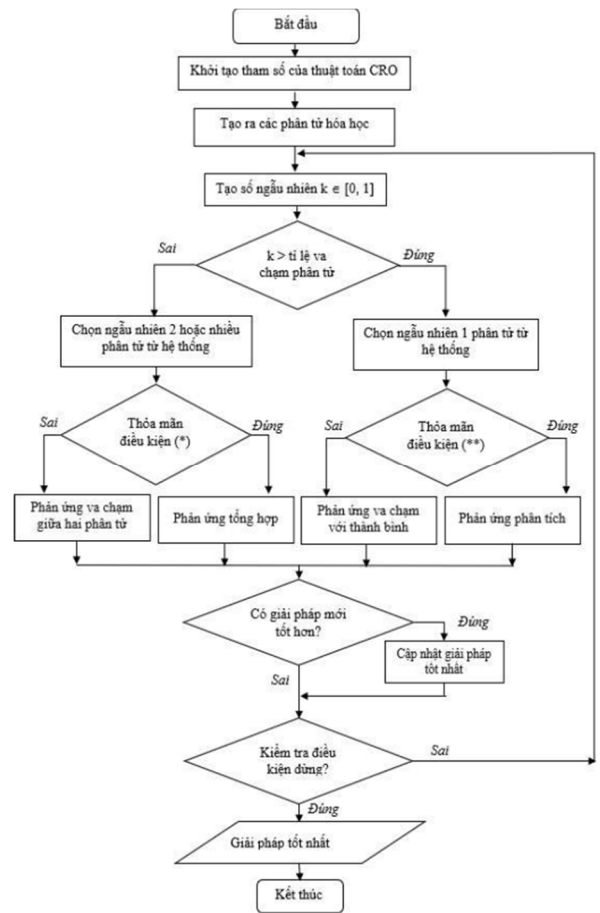
Hình 3. Ảnh hưởng của chế độ công nghệ tới độ nhám bề mặt R_a

3.2. Tối ưu hóa quá trình tiện thép SKD61

Trong nghiên cứu này, thuật toán tối ưu hóa phản ứng hóa học CRO (Chemical Reaction Optimization), được áp dụng để tối ưu hóa bộ thông số quá trình công nghệ gia công cắt gọt trong điều kiện bôi trơn tối thiểu, hướng tới mục tiêu là tối đa hóa năng suất gia công, đồng thời duy trì chất lượng bề mặt sản phẩm.

CRO là một thuật toán tối ưu hoá toàn cục (global optimization algorithm) được sử dụng để tối ưu hoá quá trình phản ứng hóa học [7]. Thuật toán này được lấy cảm hứng từ quá trình phản ứng hóa học trong tự nhiên [8], trong đó các hợp chất tương tác với nhau để tạo ra sản phẩm mong muốn. CRO sử dụng một phương pháp tương tự như thuật toán di truyền (GA - Genetic Algorithm), với việc sử dụng các "phần tử hóa học" để mô tả các điều kiện phản ứng, như nhiệt độ, áp suất, tỷ lệ phản ứng và thời gian phản ứng. Quá trình tối ưu hoá bắt đầu bằng cách tạo ra một tập hợp các "phần tử hóa học" ngẫu nhiên và thực hiện các phản ứng hóa học tương ứng. Sau đó, các "phần tử hóa học" tốt nhất được lựa chọn và kết hợp lại để tạo ra một tập hợp "phần tử hóa học" mới tốt hơn. Quá trình này được lặp đi lặp

lại đến khi đạt được một kết quả tối ưu mong muốn. Sơ đồ giải thuật CRO được trình bày như trong hình 4.

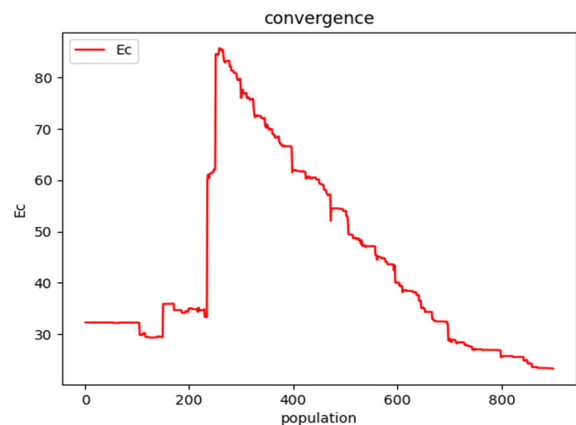


Hình 4. Sơ đồ giải thuật thuật toán tối ưu hóa phản ứng hóa học (CRO)

Ứng dụng giải thuật CRO với điều kiện biên độ nhám bề mặt sau tiện tinh trong giới hạn độ nhám gia công tinh (R_a ≤ 1,25μm) và tối đa hóa MRR ta nhận được bộ giá trị tối ưu như bảng 5 và hình 5.

Bảng 5. Bộ giá trị thông số công nghệ tối ưu được tính bởi giải thuật CRO

P (MPa)	Q (ml/giờ)	V _c (m/ph)	f _v (mm/vg)	a _p (μm)	R _a (μm)	MRR (cm ³ /ph)
6,467	50,838	159,556	0,141	499,676	1,23	12,195



Hình 5. Sự hội tụ của thuật toán CRO

4. KẾT LUẬN

Bằng sự kết hợp giữa phân tích ANOVA và giải thuật tối ưu hóa phản ứng hóa học CRO, bài báo đã phân tích được những ảnh hưởng của các thông số công nghệ quá trình cắt gọt cũng như thông số bôi trơn tới độ nhám bề mặt khi tiện tinh thép SKD61 trong điều kiện bôi trơn tối thiểu. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy, lượng chạy dao f_v và chiều sâu cắt có ảnh hưởng lớn nhất tới độ nhám bề mặt, tiếp theo là lưu lượng dầu bôi trơn Q , với mức độ quan trọng thứ 3. Với giả định là chất lượng sản phẩm sau gia công cần đạt độ nhám trong vùng gia công tinh, tức $R_a \leq 1,25\mu\text{m}$, thuật toán CRO cho bộ thông số công nghệ tối ưu là P, Q, V_c, f_v, a_p lần lượt là 6,467 (Mpa); 50,838 (ml/giờ); 159,556 (m/ph); 0,141 (mm/vg) và 499,676 (μm), tương ứng với giá trị năng suất cắt gọt MRR dự báo là 12,195 cm^3/ph và giá trị độ nhám là 1,23 μm .

Kết quả dự báo cho thấy sự khác biệt của thuật toán CRO, khi mà các giá trị của bộ thông số công nghệ tối ưu đều khác với giá trị được lựa chọn, đồng thời giá trị năng suất cắt gọt dự báo cũng lớn hơn so với giá trị MRR tối đa trong bảng thực nghiệm.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo được thực hiện với sự hỗ trợ của Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội thông qua đề tài mã số 03-2021-RD/HĐ-ĐHCN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. F. Luis, G. Moncayo, 2016. *Metal Cutting Theory and Practice, 3rd Edition*. CRC Press.
- [2]. D. Hörner, 2014. *Metalcutting Fluids BT - Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. T. Mang, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 1137–1139. doi: 10.1007/978-3-642-22647-2_235.
- [3]. D. G. Unfallversicherung, 2010. *BIG/GUV-I718E: Minimum Quantity Lubrication for Maching Operations*. Deutsche Gesetzliche, [Online]. Available: <https://fdokument.com/document/lubrificazione-minimale.html>
- [4]. R. Singh, 2020. *Minimum quantity lubrication turning of hard to cut materials - A review*. Mater. Today Proc., vol. 37, no. Part 2, pp. 3601-3605, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.769.
- [5]. Van Canh Nguyen, Thuy Duong Nguyen, Dung Hoang Tien, 2021. *Cutting Parameter Optimization in Finishing Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy under MQL Condition using TOPSIS and ANOVA Analysis*. Eng. Technol. & Appl. Sci. Res., vol. 11, no. 1, pp. 6775–6780, doi: <https://doi.org/10.48084/etasr.4015>.

[6]. N. T. Nguyen, D. D. Trung, 2021. *Combination of taguchi method, moora and copras techniques in multi-objective optimization of surface grinding process*. J. Appl. Eng. Sci., vol. 19, no. 2, pp. 390–398, 2021, doi: 10.5937/jaes0-28702.

[7]. R. K. Yadav, H. Banka, 2017. *An improved chemical reaction-based approach for multiple sequence alignment*. Curr. Sci., vol. 112, no. 3, pp. 527–538, doi: 10.18520/cs/v112/i03/527-538.

[8]. N. Siddique, H. Adeli, 2017. *Nature-Inspired Chemical Reaction Optimisation Algorithms*. Cognit. Comput., vol. 9, no. 4, pp. 411–422, doi: 10.1007/s12559-017-9485-1.

AUTHORS INFORMATION

**Hoang Tien Dzung, Pham Van Dong, Nguyen Thanh Cong,
Nguyen Chi Bao, Nguyen Ba Nghien, Nguyen Van Canh**
Hanoi University of Industry, Vietnam