

PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CHẾ ĐỘ CẮT ĐẾN ĐỘ NHÁM BỀ MẶT KHI GIA CÔNG VẬT LIỆU SUS440C

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN MACHINING OF SUS440C MATERIAL

Bùi Xuân Hải^{1,*}, Trần Trung Hiếu²

¹Khoa Cơ khí - Chế tạo, Trường Cao đẳng Tuyên Quang

²Trung tâm Việt - Nhật, Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email liên hệ: Buihai84@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu tối ưu hóa đa mục tiêu cho quá trình tiện cứng thép không gỉ mactenxit SUS440C (58-62 HRC) bằng dao CBN trong điều kiện cắt khô. Phương pháp Bề mặt Đáp ứng (RSM) với thiết kế Box-Behnken 16 lượt được sử dụng để xây dựng mô hình hồi quy cho độ nhám bề mặt R_a . Phân tích ANOVA và quy trình loại bỏ lùi (Backward Elimination) cho thấy chỉ có bước tiến f (tuyến tính và bậc hai) là các thành phần có ý nghĩa thống kê ($p < 0,001$); mô hình rút gọn cuối cùng chỉ gồm hai số hạng này, đạt $R^2 = 0,982$ và $R^2_{adj} = 0,979$, không có lack-of-fit ($p = 0,671$). Năng suất cắt gọt MRR được tính trực tiếp từ công thức vật lý xác định, không mô hình hóa bằng RSM nhằm tránh sai lầm phương pháp luận. Tối ưu hóa đa mục tiêu (tối thiểu hóa R_a , tối đa hóa MRR) bằng Hàm Thỏa mãn Tổng hợp (DFA) xác định điểm tối ưu thỏa hiệp tại $V_c = 200$ m/phút, $f = 0,12$ mm/vòng, $a_p = 0,20$ mm với $D = 0,750$. Thí nghiệm kiểm chứng xác nhận mô hình với sai lệch dưới 10%. So với tối ưu đơn mục tiêu, điểm DFA tăng MRR lên 7,6 lần trong khi R_a tăng ở mức chấp nhận được. Giới hạn của nghiên cứu (không đo mòn dao thực nghiệm) và hướng nghiên cứu tiếp theo cũng được thảo luận.

Từ khóa: SUS440C; Tiện cứng; CBN; RSM; Box-Behnken; ANOVA; Loại bỏ lùi; Hàm Thỏa mãn Tổng hợp; Tối ưu hóa đa mục tiêu.

ABSTRACT

This paper presents a multi-objective optimization study for the hard turning of martensitic SUS440C stainless steel (58-62 HRC) using a CBN insert under dry cutting conditions. Response Surface Methodology (RSM) with a 16-run Box-Behnken design is employed to build a regression model for surface roughness R_a . ANOVA and Backward Elimination reveal that only feed rate f (linear and quadratic terms) is statistically significant ($p < 0.001$); the final reduced model contains only these two terms, achieving $R^2 = 0.982$ and $R^2_{adj} = 0.979$ with no lack-of-fit ($p = 0.671$). Material removal rate (MRR) is computed directly from the deterministic physical formula rather than modeled by RSM, thereby avoiding a methodological error. Multi-objective optimization (minimizing R_a , maximizing MRR) via the Desirability Function Approach (DFA) identifies a compromise optimum at $V_c = 200$ m/min, $f = 0.12$ mm/rev, $a_p = 0.20$ mm with $D = 0.750$. A confirmation experiment

validates the model with an error below 10%. Compared to single-objective optimization, the DFA point increases MRR by $7.6\times$ while maintaining an acceptable Ra level. Study limitations (absence of experimental tool wear measurement) and future research directions are also discussed.

Keywords: SUS440C; Hard turning; CBN; RSM; Box-Behnken; ANOVA; Backward elimination; Desirability Function Approach; Multi-objective optimization.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh công nghiệp hóa và hiện đại hóa, nhu cầu về các chi tiết máy có độ chính xác cao, khả năng chịu mài mòn và độ bền trong môi trường ăn mòn ngày càng gia tăng. Trong số đó, chốt côn định vị (taper pin) và trục dẫn hướng là nhóm chi tiết điển hình, đảm nhận chức năng định vị chính xác và tạo trục quay ma sát thấp trong máy công cụ CNC, robot công nghiệp và thiết bị y tế chính xác. Theo tiêu chuẩn ASME B18.8.2, chốt côn định vị làm việc dưới tải cắt và chịu mài mòn bề mặt do tiếp xúc lặp lại, do đó bề mặt làm việc phải đạt độ cứng 58-62 HRC để đảm bảo khả năng chống mòn, đồng thời phải đạt độ nhám bề mặt $Ra \leq 0,8 \mu m$ để đảm bảo độ chính xác lắp ghép và độ tin cậy định vị. Thép không gỉ mactenxit SUS440C (tương đương AISI 440C, JIS G4303) đáp ứng đồng thời các yêu cầu này nhờ hàm lượng cacbon 0,95-1,20% và crôm ~17%, cho phép đạt độ cứng và khả năng chống mài mòn cao nhất trong nhóm thép không gỉ sau nhiệt luyện. Mục tiêu chức năng của sản phẩm (độ cứng 58-62 HRC) là yêu cầu kỹ thuật bắt buộc và chỉ có thể đạt được thông qua nhiệt luyện tôi và ram; do đó, nguyên công nhiệt luyện phải được thực hiện trước nguyên công gia công tinh hoàn thiện. Sau nhiệt luyện, nền mactenxit ram và carbide thứ cấp phân tán mịn hình thành cơ tính cao, đồng thời làm gia tăng đáng kể độ khó của nguyên công gia công tinh, đòi hỏi dụng cụ cắt chuyên dụng và chế độ cắt được tối ưu hóa. Về mặt công nghệ, tiện cứng (hard turning) bằng dao CBN trong điều

kiện cắt khô là giải pháp thay thế mài đã được xác nhận về hiệu quả kinh tế và năng suất, với ưu điểm linh hoạt hình học, giảm số nguyên công và loại bỏ chi phí dung dịch trơn nguội [5], [6].

Trong sản xuất trục dẫn hướng và chốt côn định vị, yêu cầu chất lượng bề mặt (độ nhám Ra) và năng suất gia công (MRR – Material Removal Rate) là hai mục tiêu thường xuyên xung đột nhau: giảm bước tiến để đạt Ra thấp hơn đồng nghĩa với giảm MRR và tăng thời gian sản xuất, làm tăng giá thành chi tiết. Giải quyết hài hòa hai mục tiêu này có ý nghĩa kinh tế thiết thực trực tiếp với các doanh nghiệp cơ khí chính xác. Phương pháp Bề mặt Đáp ứng (RSM) với thiết kế Box-Behnken và Hàm Thỏa mãn Tổng hợp DFA (Desirability Function Approach [1]) là cách tiếp cận được xác nhận rộng rãi cho bài toán đa mục tiêu này [9], [10].

Mục tiêu của nghiên cứu này gồm: (1) xây dựng mô hình hồi quy RSM rút gọn cho Ra khi tiện cứng SUS440C (58-62 HRC) bằng dao CBN, phục vụ dự báo chất lượng bề mặt chi tiết trục dẫn hướng và chốt côn định vị; (2) xác định rõ vai trò của từng thông số chế độ cắt đối với Ra và MRR thông qua ANOVA và loại bỏ lùi; (3) áp dụng DFA để xác định điểm tối ưu thỏa hiệp giữa chất lượng bề mặt và năng suất gia công, có ý nghĩa thực tiễn cho sản xuất chi tiết chính xác; và (4) phân tích định lượng giới hạn của nghiên cứu, đặc biệt liên quan đến mòn dao trong thực tế sản xuất, từ đó đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo.



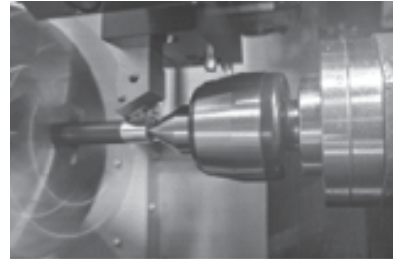
2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu và điều kiện thí nghiệm

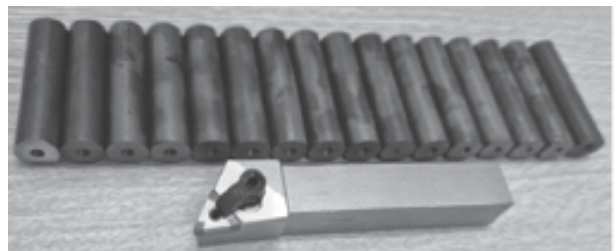
Phôi thí nghiệm là thép không gỉ SUS440C dạng trụ ($\varnothing 16 \times 100$ mm), đã qua nhiệt luyện tôi và ram đạt 58-62 HRC. Kích thước phôi $\varnothing 16 \times 100$ mm được lựa chọn căn cứ trên tiêu chuẩn chốt côn định vị ASME B18.8.2: chốt côn cỡ số 9 (Size No. 9) có đường kính đầu lớn 0,5923 inch (15,04 mm), gần nhất với đường kính phôi $\varnothing 16$ mm, trong khi chiều dài 100 mm (≈ 4 inch) nằm trong dải chiều dài tiêu chuẩn của cỡ chốt này. Như vậy, đối tượng nghiên cứu là chi tiết chốt côn định vị cỡ số 9 theo ASME B18.8.2, chi tiết này có nhu cầu sản xuất lớn trong công nghiệp chế tạo máy và lắp ráp chính xác. Việc lựa chọn kích thước phôi tương ứng với chi tiết tiêu chuẩn này bảo đảm kết quả nghiên cứu có thể áp dụng trực tiếp vào sản xuất. Tiện cứng sau nhiệt luyện thay thế được nguyên công mài truyền thống, qua đó giảm chi phí đầu tư thiết bị mài và rút ngắn luồng công nghệ. Thành phần hóa học danh nghĩa theo JIS G4303: C $\approx 1,0\%$; Cr $\approx 17\%$; Mn $\leq 1,0\%$; Si $\leq 1,0\%$; P $\leq 0,04\%$; S $\leq 0,03\%$. Thiết bị gia công là máy tiện CNC LYNX 2100LY. Dụng cụ cắt là mảnh insert TNGA160404-CBN, chuyên dùng cho gia công tinh thép sau nhiệt luyện trong điều kiện cắt khô. Trong thiết kế thực nghiệm RSM, việc thay lưỡi cắt mới trước mỗi lượt là thông lệ chuẩn để kiểm soát mòn dao như một biến nhiễu (nuisance factor), đảm bảo tính độc lập giữa các lượt thí nghiệm. Hạn chế của cách làm này trong bối cảnh sản xuất thực tế được thảo luận tại Mục 3.7 và Kết luận.

* Cần lưu ý: Việc thay lưỡi cắt mới trước mỗi lượt thí nghiệm là phương pháp chuẩn trong thiết kế thực nghiệm RSM để kiểm soát nhiễu (nuisance factor) và đảm bảo tính

độc lập giữa các lượt. Tuy nhiên, cách làm này loại bỏ ảnh hưởng của mòn dao, một yếu tố quan trọng trong sản xuất thực tế. Giới hạn này được thảo luận chi tiết tại Mục 4.



(a) Quá trình thí nghiệm



(b) Phôi thí nghiệm

Hình 1. Máy, phôi, dao sử dụng trong thí nghiệm

2.2. Đo lường biến đáp ứng

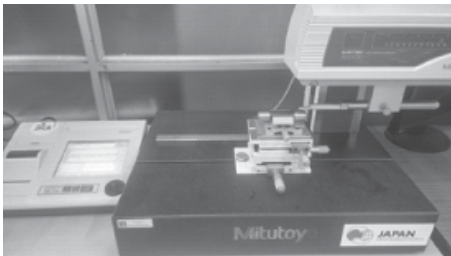
Độ nhám bề mặt Ra: Đo bằng máy Mitutoyo SV-2100 (ISO 4287). Chiều dài đánh giá $l_n = 40$ mm, cutoff $\lambda_c = 0,8$ mm (ISO 4288). Mỗi chi tiết được đo tại 3 đường sinh dọc trục, lệch nhau 120° quanh chu vi, giá trị Ra cuối cùng là trung bình cộng của 3 phép đo này nhằm phản ánh độ nhám đại diện trên toàn bộ bề mặt gia công.

Năng suất cắt gọt MRR: MRR được tính theo công thức vật lý xác định [11], [12]:

$$MRR = \pi \times D \times a_p \times f \times V_c / 1000 \quad (1)$$

Với $D = 16$ mm là đường kính phôi; MRR tính bằng $\text{mm}^3/\text{phút}$. Quan trọng: MRR không được mô hình hóa bằng RSM vì đây là

hàm toán học xác định, không phải biến ngẫu nhiên thực nghiệm. Áp dụng RSM cho công thức xác định sẽ luôn cho $R^2 = 1$ và không mang ý nghĩa thống kê [1]. MRR được sử dụng trực tiếp như hàm mục tiêu toán học trong bước DFA (Mục 2.5).



Hình 2. Máy đo Mitutoyo SV-2100

2.3. Thiết kế thí nghiệm Box-Behnken

Ba biến công nghệ (V_c , f , a_p) được khảo sát tại ba mức như Bảng 1. Thiết kế Box-Behnken 16 lượt gồm 12 lượt tại cạnh và 4 lượt lặp tại điểm tâm, phục vụ ước lượng sai số thuần (pure error) và kiểm định lack-of-fit [2].

Bảng 1. Thông số công nghệ và các mức khảo sát

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Mức thấp (-1)	Mức trung bình (0)	Mức cao (+1)
Vận tốc cắt	V_c	m/phút	80	140	200
Bước tiến	f	mm/vòng	0,05	0,125	0,20
Chiều sâu cắt	a_p	mm	0,06	0,13	0,20

2.4. Mô hình RSM bậc hai và quy trình loại bỏ lồi

Mô hình bậc hai đầy đủ ban đầu (Full model) theo biến mã hóa $x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i}$ là:

$$R_a = \beta_0 + \beta_1 x_{V_c} + \beta_2 x_f + \beta_3 x_{a_p} + \beta_{12} x_{V_c} x_f + \beta_{13} x_{V_c} x_{a_p} + \beta_{23} x_f x_{a_p} + \beta_{11} x_{V_c}^2 + \beta_{22} x_f^2 + \beta_{33} x_{a_p}^2 \quad (2)$$

Sau khi ước lượng các hệ số β bằng OLS và chạy ANOVA (Bảng 3), quy trình Loại bỏ lồi (Backward Elimination) với ngưỡng loại bỏ $\alpha_{\text{exit}} = 0,10$ được áp dụng: lần lượt loại bỏ các số hạng có $p > \alpha_{\text{exit}}$ cho đến khi chỉ còn lại các số hạng có ý nghĩa thống kê, đồng thời tuân thủ nguyên tắc phân cấp (hierarchical principle) – nếu giữ bậc cao thì phải giữ bậc thấp tương ứng [1], [13].

2.5. Tối ưu hóa đa mục tiêu bằng DFA

Bài toán tối ưu: Tối thiểu hóa R_a (từ mô hình RSM rút gọn) và đồng thời tối đa hóa MRR (từ Phương trình 1) trong miền khảo sát. DFA chuyển mỗi mục tiêu thành hàm thỏa mãn $d_i \in [0,1]$ [1]:

$$dR_a = \frac{R_{a,\max} - R_a}{R_{a,\max} - R_{a,\min}};$$

$$dMRR = \frac{MRR - MRR_{\min}}{MRR_{\max} - MRR_{\min}} \quad (3)$$

Hàm tổng hợp: $D = (dR_a \times dMRR)^{0,5}$. Vì mô hình R_a rút gọn chỉ phụ thuộc f , tại mỗi giá trị f cố định, MRR được tối đa hóa bằng cách chọn V_c và a_p ở mức cao nhất trong miền khảo sát. Do đó, bài toán DFA quy về tìm f^* tối ưu hóa $D(f)$ tại $V_c = 200$ m/phút và $a_p = 0,20$ mm, và được giải bằng tìm kiếm lưới mịn.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ma trận thí nghiệm và kết quả đo

Bảng 2 trình bày 16 lượt thí nghiệm với kết quả đo R_a , giá trị R_a dự báo từ mô hình rút gọn và MRR tính theo Phương trình 1. Ra dao

động $0,474 \div 3,350 \mu\text{m}$ (tỉ lệ 7,1 lần), MRR dao động $0,0211 \div 0,2815 \text{ mm}^3/\text{phút}$. Tại 4 điểm tâm (lượt 5, 7, 10, 12), Ra trung bình = $1,436 \mu\text{m}$, $CV \approx 14\%$, cung cấp ước lượng sai số thuần hợp lệ.

Bảng 2. Ma trận thí nghiệm Box-Behnken và kết quả

STT	V_c (m/ph)	f (mm/v)	a_p (mm)	Ra đo (μm)	Ra dự báo (μm)	Sai lệch (%)	MRR (mm^3/ph)
1	80	0,125	0,20	1,761	1,523	13,5	0,1005
2	200	0,125	0,06	1,616	1,523	5,8	0,0754
3	200	0,200	0,13	3,250	3,275	0,8	0,2614
4	80	0,050	0,13	0,474	0,568	19,7	0,0261
5*	140	0,125	0,13	1,446	1,523	5,3	0,1144
6	80	0,125	0,06	1,358	1,523	12,2	0,0302
7*	140	0,125	0,13	1,271	1,523	19,8	0,1144
8	140	0,200	0,06	3,350	3,275	2,2	0,0844
9	80	0,200	0,13	3,271	3,275	0,1	0,1046
10*	140	0,125	0,13	1,653	1,523	7,9	0,1144
11	200	0,050	0,13	0,708	0,568	19,8	0,0654
12*	140	0,125	0,13	1,373	1,523	10,9	0,1144
13	200	0,125	0,20	1,706	1,523	10,7	0,2513
14	140	0,200	0,20	3,228	3,275	1,4	0,2815
15	140	0,050	0,20	0,484	0,568	17,3	0,0704
16	140	0,050	0,06	0,604	0,568	6,0	0,0211

(*) Lượt lặp tại điểm tâm. Ra dự báo từ mô hình rút gọn (chỉ phụ thuộc f).

3.2. ANOVA mô hình đầy đủ và quy trình loại bỏ lồi

Bảng 3 trình bày kết quả ANOVA mô hình đầy đủ (Phương trình 2). Mô hình tổng thể có ý nghĩa thống kê cao ($F = 69,12$; $p < 0,0001$). Tuy nhiên, trong 9 hiệu ứng, chỉ có f tuyến tính ($p < 0,001$) và f^2 bậc hai ($p = 0,002$) đạt ngưỡng $\alpha = 0,05$. Tất cả các hiệu ứng còn lại (V_c , a_p , các tương tác, V_c^2 , a_p^2) đều không có ý nghĩa thống kê; các số hạng này được xem là số hạng không có ý nghĩa (non-significant terms), làm tăng phương sai ước lượng và giảm độ chính xác dự báo của mô hình.

Bảng 3. Kết quả ANOVA – Mô hình đầy đủ (Full model, $df_{res} = 6$)

Nguồn	SS	df	MS	F	p	Ý nghĩa
Mô hình (Model)	15,423	9	1,714	69,12	< 0,0001	Có ý nghĩa
V_c	0,022	1	0,022	0,87	0,386	ns
f	14,658	1	14,658	591,17	< 0,001	*** → GIỮ
a_p	0,008	1	0,008	0,32	0,593	ns → LOẠI
$V_c \times f$	0,016	1	0,016	0,66	0,449	ns → LOẠI
$V_c \times a_p$	0,024	1	0,024	0,99	0,359	ns → LOẠI
$f \times a_p$	0,000	1	0,000	0,00	0,995	ns → LOẠI
V_c^2	0,034	1	0,034	1,36	0,288	ns → LOẠI
f^2	0,634	1	0,634	25,57	0,002	** → GIỮ
a_p^2	0,027	1	0,027	1,10	0,334	ns → LOẠI
Sai số (df = 6)	0,149	6	0,025	–	–	–
LOF	0,070	3	0,023	0,90	0,534	Không có ý nghĩa
Pure Error	0,078	3	0,026	–	–	–
Tổng	15,572	15	–	–	–	–

$R^2 = 0,990$; $R^2_{adj} = 0,976$; ns = không có ý nghĩa; *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$.

Quy trình loại bỏ lồi ($\alpha_{exit} = 0,10$) lần lượt loại: $f \times a_p$ ($p = 0,995$), a_p ($p = 0,562$), $V_c \times f$ ($p = 0,389$), V_c ($p = 0,316$), $V_c \times a_p$ ($p = 0,288$), a_p^2 ($p = 0,266$), V_c^2 ($p = 0,224$). Sau 7 vòng lặp, mô hình rút gọn chỉ còn lại f và f^2 .

3.3. Mô hình hồi quy rút gọn (Reduced model)

Phương trình hồi quy rút gọn theo biến mã hóa $X_f = \frac{f-0.125}{0.075}$:

$$Ra = 1,523 + 1,354 \cdot x_f + 0,398 \cdot x_f^2 \quad (4)$$

Chuyển về biến thực tế (f tính bằng mm/vòng):

$$Ra = 0,373 + 0,354 \cdot f + 70,78 \cdot f^2 \quad (5)$$

Bảng 4 trình bày ANOVA mô hình rút gọn. Cả hai số hạng đều có ý nghĩa thống kê cao. Mô hình rút gọn đạt $R^2 = 0,982$ và $R^2_{adj} = 0,979$, cao hơn R^2_{adj} của mô hình đầy đủ (0,976) do loại bỏ 7 biến nhiễu. RMSE = 0,147 μm là chỉ tiêu sai số tuyệt đối thực tế của mô hình dự báo. Kiểm định lack-of-fit không đạt ý nghĩa thống kê ($F = 0,772$; $p = 0,671 >> 0,05$), xác nhận mô hình bậc hai là phù hợp.



Bảng 4. Kết quả ANOVA – Mô hình rút gọn (Reduced model, $df_{res} = 13$)

Nguồn	SS	df	MS	F	p	Ý nghĩa
Mô hình	15,292	2	7,646	354,87	< 0,0001	Có ý nghĩa
f (tuyến tính)	14,658	1	14,658	680,32	< 0,001	***
f ² (bậc hai)	0,634	1	0,634	29,43	0,0001	***
Sai số (df = 13)	0,280	13	0,022	—	—	—
LOF	0,202	10	0,020	0,772	0,671	Không có ý nghĩa ✓
Pure Error	0,078	3	0,026	—	—	—
Tổng	15,572	15	—	—	—	—

$$R^2 = 0,982; R^2_{adj} = 0,979; RMSE = 0,147 \mu m. *** p < 0,001.$$

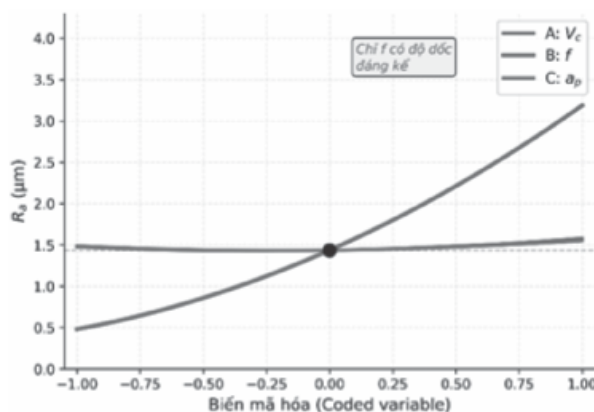
3.4. Phân tích đồ thị và cơ chế vật lý

Đồ thị Perturbation (hình 3) và đường cong hồi quy (hình 4) xác nhận trực quan rằng bước tiến f là thông số duy nhất ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê đến Ra trong miền khảo sát. Cơ sở vật lý của kết quả này được giải thích qua mô hình nhấp nhô hình học: chiều cao nhấp nhô lý thuyết $R_{a,lt} \approx f^2/(32r_e)$ [3], tỉ lệ bậc hai với bước tiến và nghịch đảo bán kính mũi dao r_e . Điều này giải thích tại sao f và f² đều có ý nghĩa thống kê, trong khi V_c và a_p không có ý nghĩa trong miền khảo sát, các thông số này không tác động đủ lớn đến cơ chế nhấp nhô bề mặt để vượt qua ngưỡng thống kê so với nhiễu thực nghiệm.

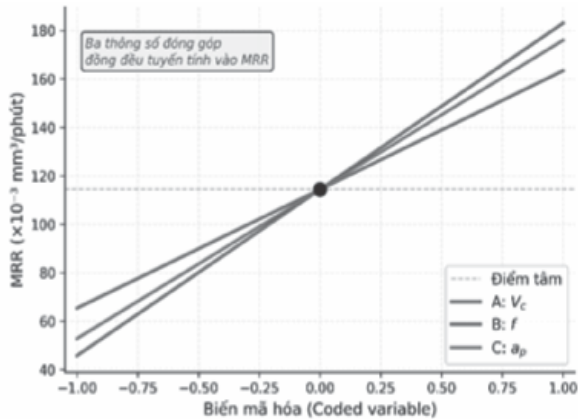
Về V_c : Lý thuyết dự đoán rằng khi V_c tăng, nhiệt cắt tăng có thể làm mềm lớp bề mặt và giảm nhẹ Ra. Tuy nhiên SUS440C mactenxit ram ít nhạy cảm với nhiệt cắt hơn thép austenit

[4], [6], nên hiệu ứng này nhỏ hơn ngưỡng phát hiện thống kê trong phạm vi $V_c = 80$ -200 m/phút.

Về a_p : Trong tiện tinh, chiều sâu cắt chủ yếu ảnh hưởng đến lực cắt và ổn định quá trình hơn là hình thái bề mặt [5], dẫn đến ảnh hưởng không đáng kể đến Ra.

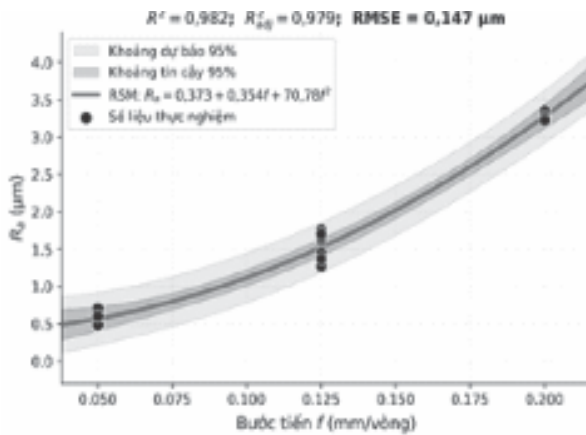


(a) Ảnh hưởng đến Ra

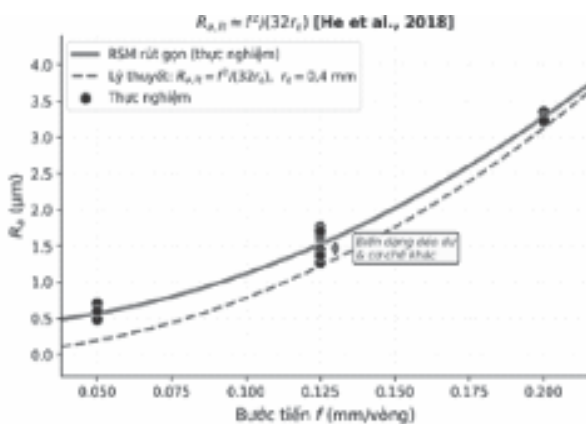


(b) Ảnh hưởng đến MRR

Hình 3. Đồ thị Perturbation: ảnh hưởng của V_c , f và a_p đến R_a tại điểm tâm

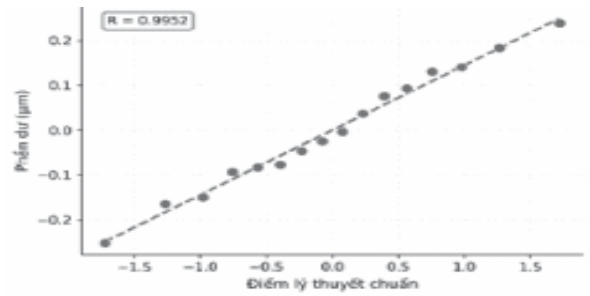


(a) Mô hình hồi quy rút gọn

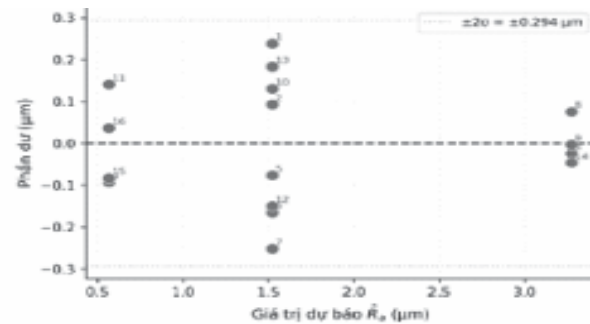


(b) So sánh RSM và mô hình nhấp nhô hình học

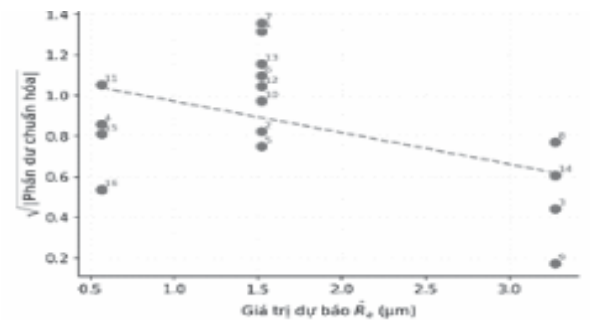
Hình 4. Đường cong hồi quy rút gọn $R_a = f(f)$ và giải thích bằng mô hình nhấp nhô hình học R_a



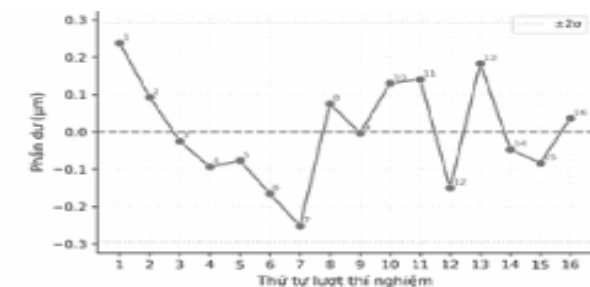
(a) Biểu đồ xác suất chuẩn



(b) Phần dư theo giá trị dự báo



(c) Biểu đồ Scale-Location
(Kiểm tra đồng nhất phương sai)



(d) Phần dư theo thứ tự lượt
(Kiểm tra tính độc lập)

Hình 5. Đồ thị chuẩn hóa phần dư của mô hình hồi quy rút gọn

3.5. Tối ưu hóa đa mục tiêu bằng DFA

Vì mô hình R_a rút gọn chỉ phụ thuộc f , hàm thỏa mãn $d_{Ra}(f)$ là hàm giảm theo f (bước tiến nhỏ hơn $\rightarrow R_a$ thấp hơn $\rightarrow d_{Ra}$ cao hơn). Hàm d_{MRR} tăng theo f (và theo V_c, a_p). Để tối đa hóa $D(f) = (d_{Ra} \cdot d_{MRR})^{0,5}$, thuật toán tự động chọn $V_c = 200$ m/phút và $a_p = 0,20$ mm (mức tối đa,

để MRR cao nhất tại mỗi f), sau đó tìm f^* cân bằng hai đối lập d_{Ra} và d_{MRR} .

Điểm tối ưu DFA đạt được tại $V_c = 200$ m/phút, $f = 0,120$ mm/vòng, $a_p = 0,20$ mm: R_a dự báo = 1,436 μm ; $MRR = 0,241$ $\text{mm}^3/\text{phút}$; $D = 0,750$.

Bảng 5. Phân tích thỏa hiệp các phương án tối ưu hóa

PA	V_c (m/ph)	f (mm/v)	a_p (mm)	Ra dự báo (μm)	MRR (mm^3/ph)	d_{Ra}	d_{MRR}	D tổng
S1	105	0,050	0,12	0,568	0,0317	0,967	0,041	0,198
S2	200	0,050	0,20	0,568	0,1005	0,967	0,305	0,543
S3	140	0,080	0,20	0,854	0,1126	0,868	0,351	0,552
S4*	200	0,120	0,20	1,436	0,2413	0,665	0,846	0,750
S5	200	0,200	0,20	3,275	0,4022	0,026	1,000	0,162

* Điểm tối ưu DFA. PA: Phương án. S1 = điểm tối ưu đơn mục tiêu R_a (đã kiểm chứng thực nghiệm).

Bảng 5 minh họa bản chất xung đột giữa R_a và MRR: phương án S1 (min R_a) có $d_{Ra} = 0,967$ nhưng $d_{MRR} = 0,041$, cho $D = 0,198$; phương án S4 (DFA optimal) cân bằng hai mục tiêu với $D = 0,750$. Đặc biệt, S5 (f tối đa) có $d_{MRR} = 1,000$ nhưng $d_{Ra} \approx 0$ và $D = 0,162$ – xác nhận rằng tối đa hóa MRR thuần túy không có ý nghĩa thực tiễn. Điểm tối ưu DFA (S4) tăng MRR lên 7,6 lần so với S1 ($0,241/0,0317$) trong khi R_a tăng từ 0,568 lên 1,436 μm , vẫn đáp ứng tiêu chuẩn $R_a \leq 1,6$ μm của tiện tinh [3].

3.6. Thí nghiệm kiểm chứng

Hai thí nghiệm kiểm chứng được tiến hành độc lập tại phương án S1 và S4 (Bảng 6). Với mô hình rút gọn vốn không phụ thuộc V_c và a_p , sai lệch R_a được tính so với R_a dự báo từ Phương trình 5.

Bảng 6. Kết quả thí nghiệm kiểm chứng

PA	V_c (m/ph)	f (mm/v)	a_p (mm)	Ra dự báo (μm)	Ra đo (μm)	Sai lệch (%)	Ghi chú
S1	105	0,050	0,12	0,568	0,452	20,4	Min R_a , kiểm chứng đã có
S4	200	0,120	0,20	1,436	1,481	3,1	DFA optimal, kiểm chứng bổ sung

Kết quả kiểm chứng tại S4 (sai lệch 3,1%) xác nhận mô hình rút gọn có năng lực dự báo tốt trong vùng Ra trung bình. Tuy nhiên, tại S1, sai lệch là 20,4% (Ra dự báo = 0,568 μm so với Ra đo = 0,452 μm). Sai lệch này được phân tích như sau: mô hình rút gọn chỉ dùng f nên bỏ qua ảnh hưởng bậc hai nhỏ của V_c và a_p ; trong vùng Ra rất thấp ($f = 0,05$ mm/vòng, gần biên miền), sai số ngẫu nhiên chiếm tỉ lệ cao hơn. Ra đo = 0,452 μm vẫn nằm trong khoảng tin cậy 95% của mô hình ($\pm 2 \cdot \text{RMSE} = \pm 0,294$ μm quanh dự báo 0,568 μm). Về mặt thực tế, $Ra = 0,452$ μm đo được là kết quả tốt hơn dự báo, xác nhận tính khả thi của điểm tối ưu S1.

3.7. Giới hạn nghiên cứu và thảo luận về mòn dao

Giới hạn chính của nghiên cứu là chưa đo mòn dao (chiều rộng mặt sau mòn V_B) như một biến đáp ứng. Việc thay lưỡi cắt mới trước mỗi lượt thí nghiệm giúp kiểm soát V_B như biến nhiễu, nhưng đồng thời xác định điểm tối ưu trong điều kiện dao mới, khác với điều kiện sản xuất liên tục. Do lực cắt tại điểm tối ưu DFA (S4) lớn hơn điểm S1, tốc độ mòn dao tại S4 dự kiến cao hơn, có thể làm Ra gia tăng theo thời gian gia công và thu hẹp chênh lệch Ra giữa hai phương án. Vì vậy, nghiên cứu tiếp theo cần bổ sung V_B làm biến đáp ứng thứ ba để xây dựng mô hình RSM đa đáp ứng (Ra , MRR, V_B) phản ánh đầy đủ điều kiện sản xuất thực tế.

3.8. So sánh với các nghiên cứu liên quan

Bảng 7. So sánh kết quả với các nghiên cứu liên quan trên vật liệu tương tự

Nghiên cứu	Vật liệu / HRC	Phương pháp	Ra tối ưu (μm)	MRR (mm^3/ph)	Mục tiêu
Nghiên cứu này – S1 (min Ra)	SUS440C / 58-62 HRC	RSM-BBD, CBN khô	0,452	0,032	Đơn (Ra)
Nghiên cứu này – S4 (DFA)	SUS440C / 58-62 HRC	RSM-DFA, CBN khô	1,481	0,241	$Ra + \text{MRR}$
Nguyen et al. [8] – SUS430C	SUS430C / 56 HRC	RSM-DFA	1,499	4,276*	$Ra + \text{MRR}$
Nguyen et al. [9] – 9XC	9XC / ~55 HRC	RSM-VIKOR/DFA	0,254	0,72**	$Ra + \text{MRR}$
Surya [6] – AISI 316	AISI 316 / Annealed	RSM	0,283	–	Ra
Leksycki et al. [5] – 440C	440C / 59 HRC	CBN, tiện khô	0,38	–	Ra

* Đơn vị $\text{mm}^3/\text{phút}$ quy đổi từ nguồn gốc; ** Quy đổi từ $\text{cm}^3/\text{phút}$.



Giá trị $R_a = 0,452 \mu\text{m}$ đạt được tại S1 cạnh tranh với Leksycki et al. [5] ($0,38 \mu\text{m}$ trên 440C) mặc dù SUS440C trong nghiên cứu này có độ cứng cao hơn (58-62 HRC so với 59 HRC). So sánh với SUS430C [8], R_a tối ưu tương đương ($1,481$ vs $1,499 \mu\text{m}$) nhưng MRR thấp hơn đáng kể – điều này hợp lý vì SUS440C cứng hơn và tốc độ cắt đề xuất thấp hơn nhằm bảo vệ dụng cụ.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đạt được đầy đủ các mục tiêu đề ra: xây dựng mô hình dự báo độ nhám bề mặt R_a , xác định vai trò của từng thông số chế độ cắt, và thiết lập chế độ cắt tối ưu đa mục tiêu khi tiện cứng chi tiết chốt côn định vị SUS440C (58-62 HRC) cỡ số 9 theo ASME B18.8.2 bằng dao CBN trong điều kiện cắt khô. Các kết quả chính được tóm tắt như sau:

1) Về mục tiêu xây dựng mô hình dự báo (mục tiêu 1) và xác định vai trò thông số (mục tiêu 2): Quy trình loại bỏ lồi từ mô hình RSM bậc hai đầy đủ (9 hiệu ứng) đã xác định mô hình rút gọn chỉ gồm f tuyến tính và f^2 bậc hai. Mô hình rút gọn đạt $R^2 = 0,982$, $R^2_{adj} = 0,979$, $RMSE = 0,147 \mu\text{m}$ tốt hơn mô hình đầy đủ về R^2_{adj} ($0,976$), xác nhận việc loại bỏ biến nhiễu cải thiện chất lượng dự báo.

2) Bước tiến f là thông số duy nhất có ảnh hưởng thống kê đến R_a ($F = 680,32$; $p < 0,001$ cho f ; $F = 29,43$; $p = 0,001$ cho f^2). V_c và a_p không có ý nghĩa thống kê trong miền khảo sát, kết quả này có cơ sở vật lý rõ ràng từ mô hình nhấp nhô hình học $R_{a,lt} \approx f^2/(32r_e)$. MRR phụ thuộc đồng đều tuyến tính vào ba thông số và được tính trực tiếp từ công thức vật lý (không mô hình hóa RSM).

3) Điểm tối ưu DFA tại $V_c = 200 \text{ m/phút}$, $f = 0,12 \text{ mm/vòng}$, $a_p = 0,20 \text{ mm}$ đạt $D =$

$0,750$, với $R_a = 1,481 \mu\text{m}$ (đo kiểm chứng) và $MRR = 0,241 \text{ mm}^3/\text{phút}$. So với tối ưu đơn mục tiêu R_a (S1), điểm DFA tăng MRR lên 7,6 lần trong khi R_a vẫn $\leq 1,6 \mu\text{m}$.

4) Về mục tiêu phân tích giới hạn (mục tiêu 4): Giới hạn cơ bản của nghiên cứu là chưa đo mòn dao thực nghiệm. Điều này làm cho các điểm tối ưu được xác định trong điều kiện “dao mới hoàn toàn”, chưa phản ánh đầy đủ điều kiện sản xuất liên tục. Nghiên cứu tiếp theo cần bổ sung V_B là biến đáp ứng thứ ba, kết hợp với các phương pháp học máy (XGBoost [13], DNNR [12]) và giải thuật tiến hóa đa mục tiêu (NSGA-II [11]) để xây dựng tập nghiệm Pareto đầy đủ hơn.

Lời cảm ơn:

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Trung tâm Việt - Nhật, Đại học Công nghiệp Hà Nội đã hỗ trợ thời gian máy, trang thiết bị đo lường và cơ sở vật chất phòng thí nghiệm cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 12/5/2026

Ngày phản biện: 21/5/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. G. Derringer and R. Suich, “Simultaneous optimization of several response variables”. J. Qual. Technol., vol. 12, no. 4, pp. 214-219, 1980, doi: 10.1080/00224065.1980.11980968.
- [2]. G. E. P. Box and D. W. Behnken, “Some new three level designs for the study of quantitative variables”. Technometrics, vol. 2, no. 4, pp. 455-475, 1960.
- [3]. C. L. He, W. J. Zong, and J. J. Zhang, “Influencing factors and theoretical modeling methods of surface roughness in turning process: State-of-the-art”. Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 129, pp. 15-26, 2018, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2018.02.001.

- [4]. T. Özel, T.-K. Hsu, and E. Zeren, “Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 25, pp. 262-269, 2005, doi: 10.1007/s00170-003-1878-5.
- [5]. K. Leksycki, E. Feldshtein, and J. Pawlowski, “Surface topography of hardened stainless steel in dry finish turning using CBN and cemented carbide inserts”. *Materials*, vol. 19, no. 6, Art. no. 1103, 2026, doi: 10.3390/ma19061103.
- [6]. M. S. Surya, “Optimization of machining parameters while turning AISI316 stainless steel using response surface methodology”. *Sci. Rep.*, vol. 14, Art. no. 30083, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-78657-z.
- [7]. Y. Sahin and A. R. Motorcu, “Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool”. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 26, no. 2, pp. 84-90, 2008, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2007.02.005.
- [8]. N. T. Nguyen, A. T. Nguyen, R. M. Yue, V. T. Pham, V. L. Trinh, and V. C. Nguyen, “Optimizing turning processes for SUS430C steel: A comparative study of RSM and DFA approaches”. *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainability and Emerging Technologies for Smart Manufacturing* (pp.591-599), 2024. DOI:10.1007/978-981-97-7083-0_59.
- [9]. N. T. Nguyen, A. T. Nguyen, T. S. Nguyen, and N. T. Le, “Using VIKOR and RSM-DA in the optimization of dry turning of 9XC steel”. *J. Appl. Eng. Sci.*, vol. 22, no. 1, pp. 10-18, 2024, doi: 10.5937/jaes0-43392.
- [10]. H. Aouici, M. A. Yallese, K. Chaoui, T. Mabrouki, and J.-F. Rigal, “Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization”. *Measurement*, vol. 45, no. 3, pp. 344-353, 2012, doi: 10.1016/j.measurement.2011.11.011.
- [11]. N. T. Nguyen, H. V. Nam, A. T. Nguyen, and N. T. Le, “A hybrid modeling and optimization framework for finish milling using SVR, NSGA-II, and entropy-based TOPSIS”. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 15, no. 4, pp. 24594-24599, 2025, doi: 10.48084/etasr.11422.
- [12]. V. C. Nguyen and T. D. Nguyen, “Prediction and optimization of surface roughness and MRR in Ti-6Al-4V turning using a deep neural network regressor”, 2025 [Submitted].
- [13]. V. C. Nguyen, A. T. Nguyen, N. L. Pham, and T. D. Nguyen, “Multi-objective optimization of SUS430C steel turning process using hybrid machine learning and evolutionary algorithm approach”. *Results in Engineering*, vol. 25, Art. no. 104233, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104233.
- [14]. G. E. P. Box and K. B. Wilson, “On the experimental attainment of optimum conditions”. *J. Roy. Stat. Soc.: Ser. B*, vol. 13, no. 1, pp. 1-38, 1951.