Nghiên cứu công nghệ gia công cao tốc rãnh xoắn ngoài ma sát lăn

Research on High-Speed Machining Technology for External Helical Grooves Using Rolling-Friction Contact

ThS. Vũ Thị Thủy

Khoa Cơ Khí, Trường Đại học Công nghệ Đông Á

Email: thuyvt@eaut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu đề xuất khung phương pháp cho gia công cao tốc rãnh xoắn ngoài bằng tiếp xúc ma sát lăn, liên kết động học C–Z, mô hình lực cắt, tiếp xúc đàn hồi và phát nhiệt với chương trình kiểm chứng Taguchi/RSM. Chín trường hợp số liệu minh họa được phân tích, không phải kết quả đo thực nghiệm hoặc dự báo từ mô hình đã hiệu chuẩn. Phân tích hiệu ứng chính mô tả cho thấy lượng chạy dao chiếm 70,59% biến thiên lực cắt, tốc độ cắt chiếm 81,60% biến thiên nhiệt độ và lực ép chiếm 61,02% biến thiên sai số bước trong bộ số liệu L9. Các tỷ lệ này không phải kết quả kiểm định ý nghĩa thống kê. Miền khảo sát tiếp theo được đề xuất gồm V_c = 500–650 m/phút, f = 0,06–0,10 mm/vòng quy đổi, F_n = 300–450 N và lưu lượng MQL Q = 60–90 mL/h. Các biên của miền này cần được khảo sát bổ sung và kiểm tra theo giới hạn máy, ứng suất tiếp xúc, nhiệt và độ chính xác. Nghiên cứu cung cấp cơ sở cho hiệu chuẩn và thực nghiệm tiếp theo; mức giảm thời gian gia công, nhiệt độ và mòn dao so với phương pháp truyền thống chưa được kiểm chứng.

Từ khóa: *Gia công cao tốc; rãnh xoắn ngoài; ma sát lăn; mô hình động học; lực cắt; nhiệt cắt; quy hoạch thực nghiệm.*

ABSTRACT

This study presents a methodological framework for high-speed machining of external helical grooves using rolling-friction contact. The framework links C–Z kinematics, cutting-force modelling, elastic contact and heat generation with a proposed Taguchi/RSM validation programme. A nine-case illustrative dataset is analysed; it does not represent experimental measurements or a calibrated predictive model. Descriptive main-effect analysis assigns 70.59% of the cutting-force variation to feed, 81.60% of the temperature variation to cutting speed, and 61.02% of the lead-error variation to normal pressing force. These percentages describe the supplied L9 dataset and do not establish statistical significance. The provisional investigation window is V_c = 500–650 m/min, f = 0.06–0.10 mm per equivalent revolution, F_n = 300–450 N and MQL flow rate Q = 60–90 mL/h. Its exact boundaries require further sampling and verification against machine, contact-stress, thermal and dimensional limits. The study therefore provides a basis for subsequent calibration and testing, while reductions in machining

DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821

time, temperature and tool wear relative to conventional machining remain to be demonstrated.

Keywords: *high-speed machining; external helical groove; rolling friction; kinematic model; cutting force; cutting temperature; design of experiments.*

1. Giới thiệu (Introduction)

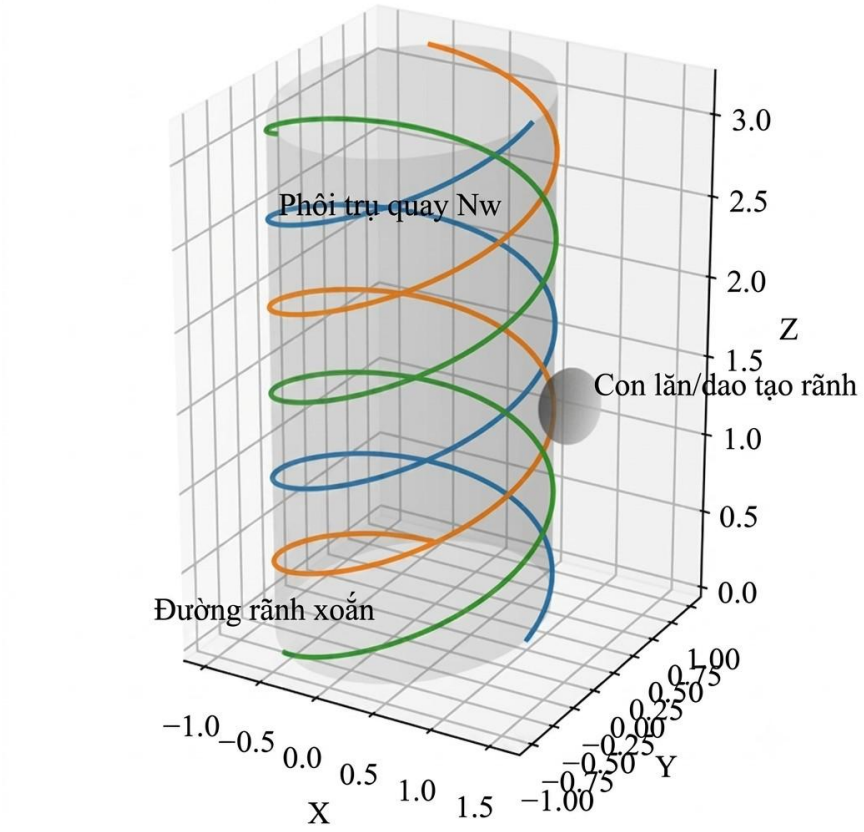
Rãnh xoắn ngoài xuất hiện trong nhiều nhóm chi tiết cơ khí như trục dẫn hướng, vít tải nhỏ, trục truyền động có rãnh dầu, chi tiết then hoa xoắn, cam trụ và các kết cấu tạo chuyển động kết hợp quay - tịnh tiến. Trong sản xuất hàng loạt, yêu cầu đặt ra không chỉ là bảo đảm bước xoắn và biên dạng rãnh mà còn phải nâng cao năng suất, giảm biến dạng nhiệt, giảm mòn dụng cụ và duy trì chất lượng bề mặt ổn định. Các phương pháp phổ biến gồm phay xoắn, tiện ren/rãnh, mài định hình hoặc cán/rê ép. Tuy nhiên, khi tốc độ cắt tăng, vùng tiếp xúc dao - phôi chịu tải nhiệt - cơ học lớn, dẫn đến dao mòn nhanh, rung động tự kích và sai số bước xoắn nếu điều khiển không đồng bộ.

Gia công cao tốc cho phép tăng tốc độ bóc tách vật liệu và cải thiện năng suất, nhưng quá trình này chỉ ổn định khi quỹ đạo dụng cụ đủ trơn, máy có độ cứng vững cao và mô hình điều khiển có khả năng đồng bộ chính xác giữa chuyển động quay của phôi và chuyển động chạy dao dọc/trục của dụng cụ. Nền tảng lý thuyết cắt gọt hiện đại đã được hệ thống hóa trong các mô hình cơ học cắt, động lực học máy công cụ và thiết kế CNC [1]. Đối với dụng cụ có lưỡi xoắn, mô hình cơ học phay và hệ số lực có thể xác định theo cơ sở cắt trực giao hoặc hiệu chỉnh bằng thực nghiệm [2], [3].

Trong cụm dụng cụ có thành phần lăn, tiếp xúc có thể đồng thời xuất hiện lăn và trượt vi mô. Thành phần lăn có khả năng giảm vận tốc trượt, nhưng mức giảm phát nhiệt còn phụ thuộc tải, bôi trơn và trạng thái tiếp xúc. Vì vậy, không thể mặc định rằng tăng lực ép luôn làm giảm ma sát hoặc nhiệt. Dữ liệu vật liệu và ma sát là đầu vào quan trọng của mô hình cắt gọt [4]; các vấn đề dự báo nhiệt và lựa chọn luật ma sát được phân tích trong [5] và [6].

Khác với mô hình lực cho dao phay xoắn [2], [3] và các nghiên cứu riêng về dữ liệu ma sát hoặc nhiệt [4]–[6], đóng góp của bài báo là đề xuất cách liên kết đồng bộ C–Z với tải ép và trạng thái lăn–trượt khi lập kế hoạch khảo sát rãnh xoắn ngoài. Đóng góp định lượng giới hạn ở việc phân tích lại chín trường hợp minh họa bằng trung bình theo mức và tỷ phần tổng bình phương. Bài báo không đề xuất một định luật tiếp xúc mới và chưa chứng minh tính ưu việt của công nghệ bằng thử nghiệm đối chứng. Mô hình vật lý trình bày dưới đây định hướng việc hiệu chuẩn; các giá trị minh họa không được coi là kết quả của một mô hình vật lý đã kiểm chứng.

DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821



Hình 1. Sơ đồ hình học rãnh xoắn ngoài trên phôi trụ và cụm tiếp xúc ma sát lăn.

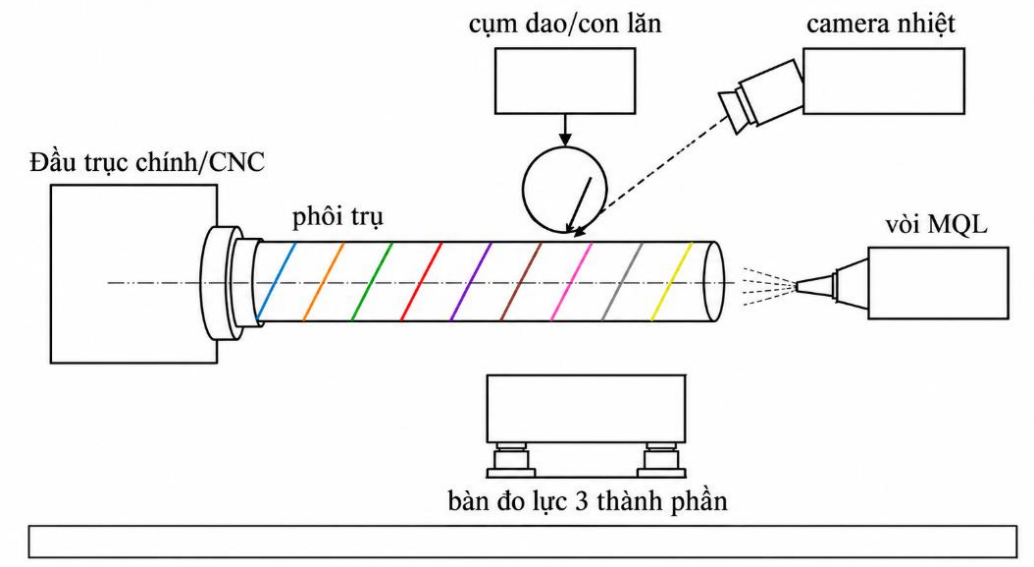
2. Phương pháp nghiên cứu và kết quả

2.1. Mẫu nghiên cứu, thiết bị và quy trình công nghệ

Cấu hình nghiên cứu đề xuất sử dụng phôi thép hợp kim tôi cải thiện, độ cứng 28–32 HRC, đường kính D = 42 mm và chiều dài gia công L = 120 mm. Các mác 40Cr và AISI 4140 là các phương án vật liệu cần lựa chọn, không được coi là đồng nhất hoặc dùng chung hệ số hiệu chuẩn. Rãnh có lượng tiến dọc trục sau một vòng phôi p = 36 mm, bề rộng w_g = 1,8 mm và chiều sâu a_p = 0,85 mm. Với z_g đầu mối, khoảng cách dọc trục giữa hai đầu mối kề nhau bằng p/z_g. Dụng cụ dự kiến là cụm dao tạo rãnh có thành phần tiếp xúc lăn, phủ TiAlN hoặc AlCrN, bán kính đỉnh r_e = 0,4–0,8 mm và có cơ cấu điều chỉnh lực ép F_n.

Hệ thống thí nghiệm dự kiến gồm máy CNC đồng bộ trục C–Z, cảm biến lực ba thành phần, camera nhiệt hoặc pyrometer, đầu phun bôi trơn lượng tối thiểu (MQL), thiết bị đo nhám và thiết bị đo biên dạng. Quy trình dự kiến gồm chuẩn bị đường kính chuẩn, gá đặt và kiểm tra đồng tâm, chạy không tải để kiểm tra nội suy C–Z, gia công thử, đo các đáp ứng và hiệu chỉnh thông số trước khi gia công đủ chiều sâu. Đây là cấu hình đề xuất; bài báo chưa báo cáo kết quả vận hành thực tế của hệ thống.

DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821



Hình 2. Sơ đồ hệ thống thí nghiệm đề xuất, chưa phải ảnh thiết bị đã triển khai.

Bảng 1. Điều kiện nghiên cứu và phạm vi khảo sát ban đầu.

Nội dung	**Giá trị đề xuất**	**Ghi chú**
Vật liệu phôi	Thép 40Cr hoặc AISI 4140; 28–32 HRC	Chọn một mác và hiệu chuẩn riêng
Dụng cụ	Dao/con lăn tạo rãnh phủ TiAlN/AlCrN	Bán kính đỉnh 0,4-0,8 mm
Đường kính phôi D	42 mm	Dải khảo sát 30-60 mm
Lượng tiến một vòng p	36 mm/vòng phôi	Mục tiêu sai số tích lũy < 0,03 mm/100 mm
Tốc độ cắt V_c	350–750 m/phút	Miền khảo sát minh họa; cần xác nhận khả năng máy
Lượng chạy dao f	0,06–0,14 mm/vòng quy đổi	Chưa đồng nhất với chạy dao Z trên một vòng phôi
Lực ép F_n	250-550 N	Kiểm tra khả năng bám và ứng suất tiếp xúc
Bôi trơn	MQL 30–90 mL/h	Dầu ester hoặc dầu thực vật biến tính
Đại lượng cần đo	F, T, R_a, R_z, Δp, mòn dụng cụ	Đề xuất đo lực, nhiệt, nhám, sai số và mòn

DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821

2.2. Thiết kế thí nghiệm và mô hình mô phỏng

Ma trận Taguchi L9 gồm bốn yếu tố, mỗi yếu tố ba mức, được dùng để tổ chức bộ số liệu minh họa và phân tích hiệu ứng chính. Mỗi mức xuất hiện ba lần, nhưng ba trường hợp này có tổ hợp các yếu tố khác nhau, không phải ba lần lặp cùng điều kiện. Bốn yếu tố sử dụng hết tám bậc tự do của chín trường hợp; do đó không còn bậc tự do độc lập để ước lượng sai số hoặc kiểm định F. Giai đoạn thực nghiệm tiếp theo cần có các lần lặp và điểm xác nhận; thiết kế RSM/CCD sẽ được bổ sung nếu cần mô hình bậc hai và các tương tác.

Khung mô hình gồm động học C–Z, lực cắt, tiếp xúc đàn hồi và phát nhiệt. F_n là tải ép tại tiếp xúc lăn, còn F_{tb} là đáp ứng lực cắt tổng hợp trung bình trong bộ số liệu; hai đại lượng không được đồng nhất. Chưa có đầy đủ hệ số lực, hình học tiếp xúc, độ cứng cụm gá, thông số nhiệt và điều kiện biên để tái lập một mô phỏng vật lý đã hiệu chuẩn. Vì vậy, Bảng 3 được giữ ở vai trò dữ liệu minh họa; Hình 3–6 được xây dựng trực tiếp từ bảng này để mọi kết luận định lượng có thể kiểm tra lại.

2.2.1. Động học và định nghĩa thông số

Gọi N_w là tốc độ phôi (vòng/phút), v_z là vận tốc dọc trục (mm/s), p là lượng tiến dọc trục sau một vòng phôi và β là góc nâng đường xoắn so với mặt phẳng vuông góc trục. Với D là đường kính phôi, các quan hệ hình học và sai số vi phân bậc nhất là:

$$p = \frac{60 v_z}{N_w}, \qquad \tan\beta = \frac{p}{\pi D}, \qquad \frac{\delta p}{p} \approx \frac{\delta v_z}{v_z} - \frac{\delta N_w}{N_w} \qquad (1)$$

Ở D = 42 mm và p = 36 mm, β ≈ 15,3°. Vì vậy, f = 0,06–0,14 mm/vòng trong bộ số liệu không thể đồng thời là lượng chạy dao Z trên một vòng phôi của rãnh này. Trong phân tích minh họa, f được ký hiệu là lượng chạy dao quy đổi; việc gắn f với vòng quay dụng cụ, lượng tiến trên răng hoặc lượng ăn dao cụ thể cần được xác nhận theo cấu hình máy. V_c cũng phải được xác định theo vận tốc cắt tương đối thực, không mặc định là vận tốc vòng của phôi. Trong phạm vi bài báo này, f được sử dụng như một biến công nghệ quy đổi của bộ số liệu L9 để so sánh tương đối giữa các trường hợp; f không đồng nhất với p = 36 mm/vòng phôi và không được dùng để suy ra vận tốc chạy dao Z hoặc lượng chạy dao vật lý trước khi cấu hình truyền động thực được xác định.

Cột MRR của dữ liệu ban đầu tương thích, trong sai số làm tròn, với một chỉ số quy đổi:

$$N_{eq} = \frac{1000 V_c}{\pi D}, \qquad \mathrm{MRR}_{eq} = \frac{w_g a_p f N_{eq}}{60} \qquad (2)$$

Ở (2), Vc tính bằng m/phút, các kích thước tính bằng mm và MRReq tính bằng mm^3/s. Neq chỉ là tốc độ quy đổi, không được đồng nhất với Nw. Chỉ số này dùng để so

DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821

sánh nội bộ dữ liệu minh họa; chưa đại diện năng suất bóc tách vật liệu của quỹ đạo xoắn thực và không dùng để suy ra thời gian chu kỳ.

2.2.2. Liên hệ lực ép với tiếp xúc và trượt

Với xấp xỉ hai bề mặt tạo tiếp xúc đường đàn hồi, nửa bề rộng tiếp xúc b và áp suất cực đại p_0 được xác định theo Hertz [7]:

$$b=\sqrt{\frac{4F_nR^*}{\pi\ell E^*}},\qquad p_0=\frac{2F_n}{\pi b\ell}\qquad (3)$$

Trong đó ℓ là chiều dài tiếp xúc hữu hiệu, R* và E* là bán kính và mô đun đàn hồi tương đương của cặp tiếp xúc. Công thức chỉ áp dụng khi hình học tương thích với tiếp xúc đường và biến dạng còn đàn hồi; tiếp xúc điểm hoặc vùng đã lún dẻo cần mô hình khác. Bán kính đỉnh dao re không tự động bằng R*.

Gọi u_1 và u_2 là vận tốc tiếp tuyến có dấu của hai bề mặt theo cùng phương, hệ số trượt quy ước S, khả năng truyền lực và công suất trượt tại tiếp xúc lăn được biểu diễn bởi:

$$S=\frac{u_1-u_2}{\max(|u_1|,|u_2|)},\quad |F_t|\le\mu F_n,\quad P_{\text{slip}}=|F_t||u_1-u_2|\qquad (4)$$

Quan hệ (4) áp dụng khi có chuyển động; μ là hệ số bám/ma sát hữu hiệu phụ thuộc điều kiện tiếp xúc. S = 0 biểu thị lăn thuần túy theo phương xét; $|F_t| \le \mu F_n$ là điều kiện khả năng bám, không bảo đảm toàn bộ vùng tiếp xúc không có trượt vi mô. Khi F_t yêu cầu vượt khả năng này, nguy cơ trượt lớn tăng. Tăng F_n làm tăng giới hạn truyền lực nếu μ không đổi, đồng thời tăng áp suất và biến dạng. Biến dạng đàn hồi kết cấu có thể ước lượng ban đầu bằng F_n/k_{eq} với keq là độ cứng tương đương đã đo; không đủ cơ sở để suy ra trực tiếp Δp chỉ từ thay đổi bán kính tiếp xúc.

Nhiệt do trượt là một nguồn cần đưa vào bài toán nhiệt chuyển động [8], bên cạnh các nguồn nhiệt của cắt gọt [5]. Bài báo chưa nhận dạng μ, k_{eq}, tỷ lệ phân bố nhiệt hoặc điều kiện trao đổi nhiệt, nên không tính giá trị F_n tới hạn hay T_{max} từ các công thức trên.

2.2.3. Cách tính các chỉ tiêu định lượng

Với đáp ứng y và yếu tố j có mức k, lấy trung bình ba trường hợp chứa mức đó, ký hiệu $\bar{y}_{jk}$; trung bình chín trường hợp là $\bar{y}$. Độ rộng hiệu ứng là $R_j = \max(\bar{y}_{jk}) - \min(\bar{y}_{jk})$. Tỷ phần tổng bình phương được tính như sau:

$$SS_j=3\sum_{k=1}^{3}(\bar{y}_{jk}-\bar{y})^2,\quad SS_T=\sum_{i=1}^{9}(y_i-\bar{y})^2,\quad P_j=100\frac{SS_j}{SS_T}\ (\%)\quad (5)$$

Tỷ phần P_j phản ánh cách biến thiên của chín giá trị được phân bổ cho các cột hiệu ứng chính của L9. Vì thiết kế bão hòa và không có lặp, P_j không phải tỷ lệ đóng góp đã

DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821

kiểm định thống kê; các tương tác có thể bị lẫn vào hiệu ứng chính. Không ước lượng riêng tương tác $V_c \times f$ từ thiết kế này. Trong Bảng 3, Δp được sử dụng như chỉ số sai lệch bước minh họa của từng trường hợp; chiều dài đánh giá chưa được ấn định, vì vậy các giá trị Δp không được quy đổi hoặc so sánh trực tiếp với yêu cầu 0,03 mm/100 mm cho đến khi quy trình đo và chiều dài chuẩn được xác nhận.

Bảng 2. Các mức yếu tố của ma trận Taguchi L9.

Yếu tố	Mức 1	Mức 2	Mức 3	Ý nghĩa
A - V_c (m/phút)	350	550	750	Tốc độ cắt hoặc tốc độ tương đối vùng tiếp xúc
B – f (mm/vòng quy đổi)	0,06	0,1	0,14	Thông số chạy dao quy đổi; xem Mục 2.2.1
C - F_n (N)	250	400	550	Lực ép pháp tuyến của cụm lăn/dao
D – Q (mL/h)	30	60	90	Lưu lượng bôi trơn tối thiểu MQL

Bảng 3. Chín trường hợp số liệu minh họa theo L9, không phải số liệu thực nghiệm.

Lần	V_c (m/phút)	f (mm/vòng quy đổi)	F_n (N)	Q (mL/h)	F_{tb} (N)	T_{max} (°C)	R_a (µm)	Δp (mm)	MRR_{eq} (mm³/s)
1	350	0,06	250	30	184,6	151,6	0,359	0,0077	4,06
2	350	0,1	400	60	243,8	153,8	0,421	0,0093	6,76
3	350	0,14	550	90	303,4	156	0,513	0,0111	9,47
4	550	0,06	400	90	205	172,4	0,234	0,0078	6,38
5	550	0,1	550	30	267,9	219,7	0,405	0,0095	10,63
6	550	0,14	250	60	256,1	190,6	0,377	0,008	14,88
7	750	0,06	550	60	233,7	239,7	0,362	0,0097	8,7
8	750	0,1	250	90	222,2	210,6	0,304	0,0083	14,49
9	750	0,14	400	30	285,1	258	0,505	0,01	20,29

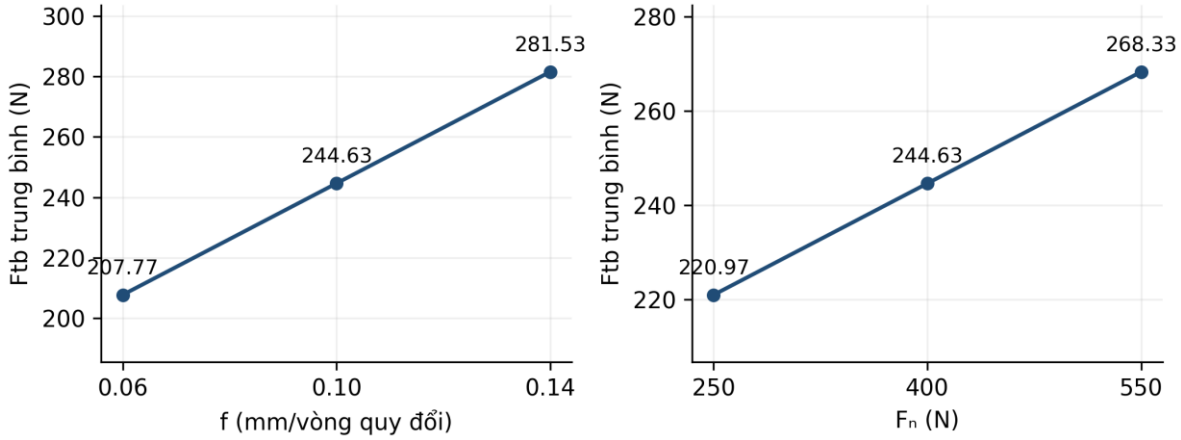
DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821

2.3. Kết quả phân tích bộ số liệu minh họa

Khi f tăng qua các mức 0,06; 0,10 và 0,14 mm/vòng quy đổi, F_{tb} trung bình theo mức lần lượt là 207,77; 244,63 và 281,53 N; R_a tương ứng là 0,3183; 0,3767 và 0,4650 µm. Chênh lệch giữa hai mức biên là 73,77 N (35,50%) đối với lực và 0,1467 µm (46,07%) đối với nhám. Đây là so sánh trung bình theo mức của L9, không phải thí nghiệm chỉ thay đổi riêng f. Trong bộ dữ liệu này, f có tỷ phần biến thiên lớn nhất đối với F_{tb} (70,59%) và R_a (51,86%).

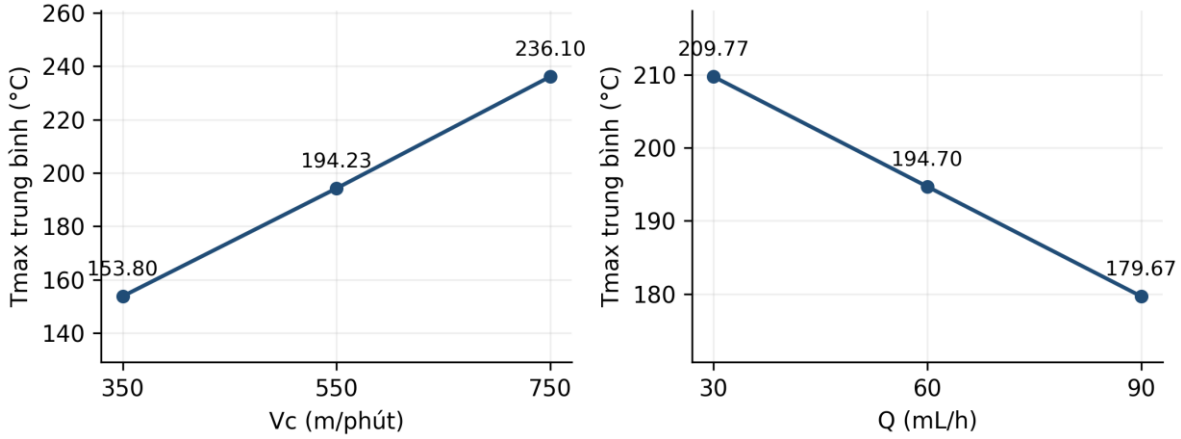
Khi V_c tăng từ 350 lên 750 m/phút, T_{max} trung bình tăng từ 153,80 lên 236,10 °C, tức tăng 82,30 °C; F_{tb} trung bình chỉ thay đổi trong khoảng 243,00–247,00 N. Mức Vc = 550 m/phút cho R_a trung bình nhỏ nhất, 0,3387 µm, so với 0,4310 µm tại 350 m/phút và 0,3903 µm tại 750 m/phút. Khi Q tăng từ 30 lên 90 mL/h, T_{max} trung bình giảm 30,10 °C và R_a giảm từ 0,4230 xuống 0,3503 µm (17,18%). Kết quả này chỉ hỗ trợ xu hướng trong miền minh họa, chưa xác định được ngưỡng nhiệt an toàn hoặc hiệu quả MQL ngoài miền khảo sát.

Khi F_n tăng từ 250 lên 550 N, Δp trung bình tăng từ 0,0080 lên 0,0101 mm (tăng 26,25%), F_{tb} tăng 47,37 N và R_a tăng 0,0800 µm. Bộ dữ liệu vì vậy mô tả xu hướng sai số tăng ở miền tải khảo sát, không chứa bằng chứng về nhánh giảm sai số do khắc phục thiếu lực bám ở tải thấp. Thứ tự tỷ phần biến thiên của R_a là f > V_c > F_n > Q; của T_{max} là V_c > Q > F_n > f; của Δp là F_n > f > V_c > Q. Các thứ tự này phụ thuộc bộ dữ liệu và giả thiết hiệu ứng chính.

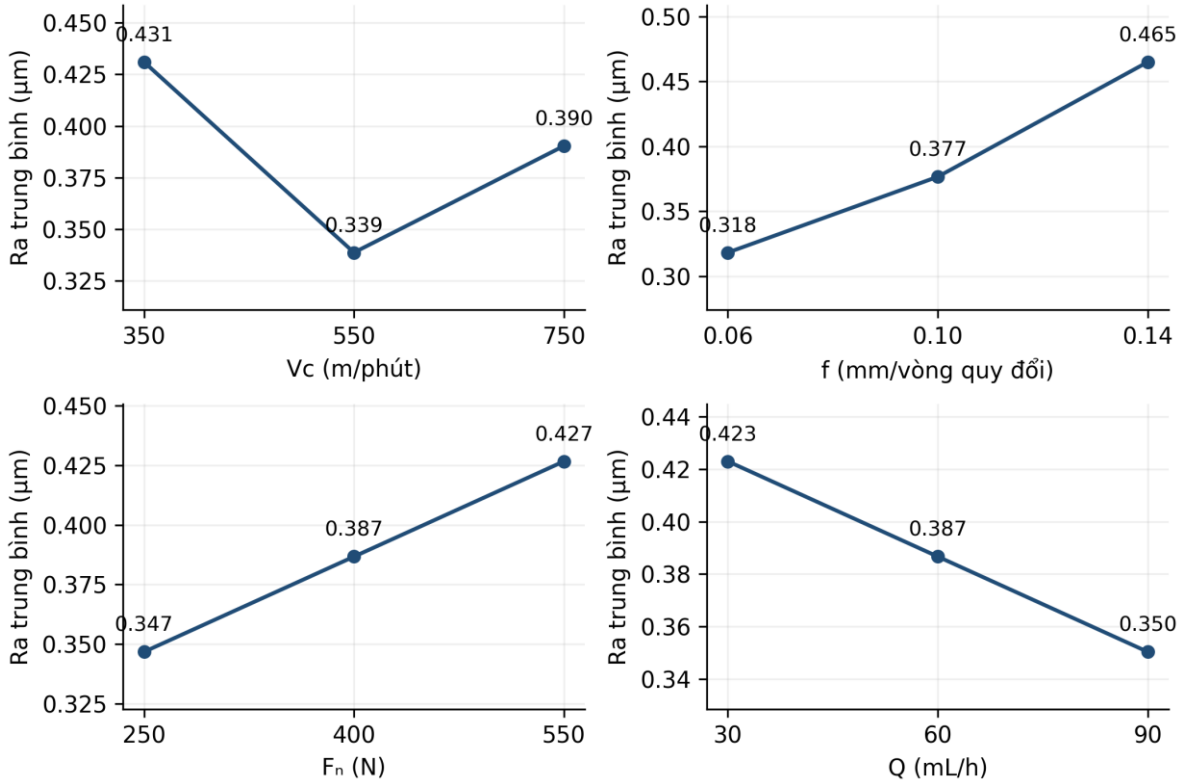


Hình 3. Trung bình F_{tb} theo mức f và F_n, tính từ Bảng 3; đường nối chỉ dẫn hướng đọc.

DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821

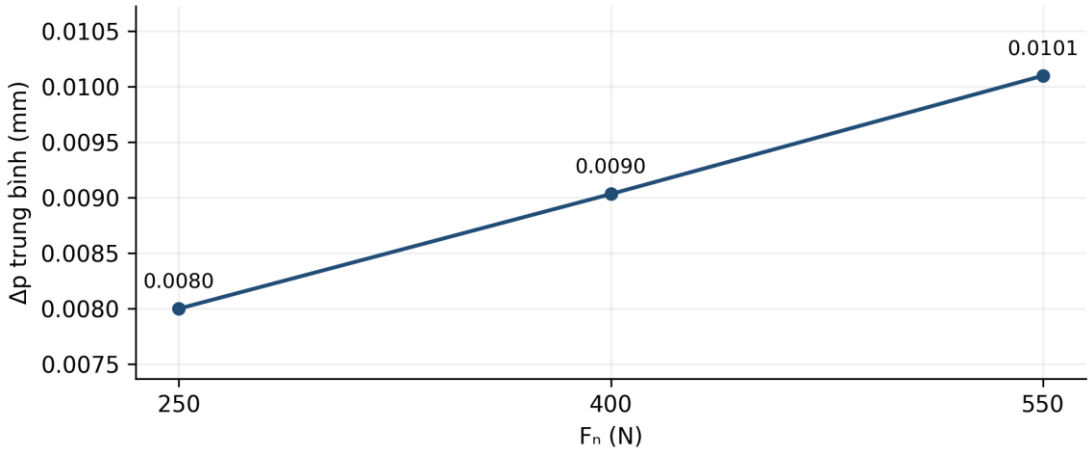


Hình 4. Trung bình T_{max} theo mức V_c và Q, tính từ Bảng 3; không phải đường thực nghiệm.



Hình 5. Trung bình R_a theo ba mức của từng yếu tố, tính từ Bảng 3.

DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821



Hình 6. Trung bình Δp theo F_n, tính từ Bảng 3; chiều dài đánh giá sai số cần được xác nhận.

Bảng 4. Tỷ phần tổng bình phương của các hiệu ứng chính trong Bảng 3 (%).

Yếu tố	F_{tb}	T_{max}	R_a	Δp
V_c	0,23	81,60	20,37	15,52
f	70,59	2,24	51,86	23,39
F_n	29,11	5,25	15,22	61,02
Q	0,07	10,91	12,56	0,08

Ghi chú: tính theo (5) từ Bảng 3; tổng mỗi cột xấp xỉ 100% do làm tròn. Không có ước lượng sai số độc lập hoặc kiểm định ý nghĩa thống kê.

2.4. Cơ sở chọn miền thông số và quy trình kiểm chứng

Miền V_c = 500–650 m/phút, f = 0,06–0,10 mm/vòng quy đổi, F_n = 300–450 N và Q = 60–90 mL/h được giữ như một giả thuyết công nghệ để khảo sát tiếp. Cơ sở định hướng là R_a trung bình thấp nhất tại V_c = 550 m/phút, lực và nhám tăng theo f, sai số tăng theo F_n trong miền minh họa, và nhiệt độ trung bình giảm khi tăng Q. Tuy nhiên, các biên 500; 650 m/phút và 300; 450 N chưa được lấy mẫu trong L9 nên không phải giới hạn tối ưu đã xác định bằng hồi quy hoặc thực nghiệm.

Trong chín trường hợp, trường hợp 4 (V_c = 550 m/phút, f = 0,06 mm/vòng quy đổi, F_n = 400 N, Q = 90 mL/h) có Ra nhỏ nhất, 0,234 µm, đi kèm F_{tb} = 205,0 N, T_{max} = 172,4 °C và Δp = 0,0078 mm. Đây là điểm tham chiếu phù hợp cho khảo sát ưu tiên nhám, không phải nghiệm tối ưu toàn cục. So với trường hợp 4, trường hợp 8 có chỉ số MRR quy đổi lớn hơn 127,1%, nhưng T_{max} cao hơn 38,2 °C và R_a cao hơn 29,9%; do nhiều yếu tố thay đổi đồng thời, so sánh này chỉ minh họa sự đánh đổi giữa các đáp ứng.

DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821

Các tiêu chí kiểm chứng gồm: (i) độ nhám không vượt giới hạn trên của yêu cầu thiết kế, hiện dự kiến $R_a \leq 1{,}6$ µm; (ii) sai số bước tích lũy nhỏ hơn 0,03 mm trên chiều dài đánh giá 100 mm; (iii) tải và áp suất tiếp xúc nằm trong giới hạn của dụng cụ, ổ lăn và vật liệu; (iv) nhiệt độ, rung và mòn không vượt giới hạn được xác lập bằng thử nghiệm; (v) cơ cấu C–Z đáp ứng tốc độ, gia tốc và sai số đồng bộ yêu cầu. Tất cả giá trị R_a ở Bảng 3 đều nhỏ hơn 0,6 µm, nên tiêu chí nhám hiện tại không đủ để phân biệt miền đạt và không đạt. Δp chưa có chiều dài đánh giá xác định, do đó chưa thể so trực tiếp với yêu cầu 0,03 mm/100 mm. Các giới hạn tải và nhiệt chưa được hiệu chuẩn, nên chưa thể khẳng định miền đề xuất đáp ứng toàn bộ tiêu chí.

Với MQL, Q = 60–90 mL/h là miền ưu tiên kiểm chứng vì tăng Q từ 30 lên 60 mL/h và từ 60 lên 90 mL/h làm T_{max} trung bình giảm lần lượt 15,07 và 15,03 °C trong dữ liệu minh họa. Cần ghi nhận loại dầu, áp suất khí, vị trí vòi phun và khả năng đưa dầu vào vùng tiếp xúc; lưu lượng danh nghĩa riêng lẻ không xác định được hiệu quả bôi trơn. Tăng Q có thể làm giảm ma sát trượt nhưng cũng thay đổi khả năng truyền lực tiếp tuyến của cơ cấu lăn, nên phải kiểm tra đồng thời trạng thái trượt và nhiệt độ.

Quy trình kiểm chứng đề xuất: xác nhận vật liệu và hình học dụng cụ; xác định quan hệ giữa f quy đổi với chuyển động cắt thực tế; kiểm tra quỹ đạo C–Z không tải; đo lực–nhiệt–trượt ở tải thấp; tăng tải và chiều sâu có kiểm soát; đo nhám và sai số bước trên chiều dài quy định. Tiếp đó, bổ sung các điểm trong và ngoài miền đề xuất cùng các lần lặp để hiệu chuẩn hệ số lực, ma sát và nhiệt. Ba đến năm mẫu thăm dò chỉ hỗ trợ kiểm tra ban đầu, không đủ để nhận dạng một mô hình bậc hai đầy đủ với bốn yếu tố.

Việc lựa chọn cuối cùng cần dựa trên tập nghiệm thỏa ràng buộc và so sánh Pareto giữa nhám, sai số, nhiệt và năng suất đo thực tế. Chưa sử dụng hàm tổng trọng số J để công bố nghiệm tối ưu vì chưa xác định trọng số, cách chuẩn hóa và giới hạn đáp ứng. Các miền tại Bảng 5 chỉ định hướng lấy mẫu; phải xác nhận bằng các điểm kiểm tra độc lập trước khi áp dụng vào sản xuất.

Bảng 5. Các miền đề xuất để khảo sát tiếp, chưa phải chế độ đã kiểm chứng.

Chế độ	V_c (m/phút)	f (mm/vòng quy đổi)	F_n (N)	Q (mL/h)	Mục đích khảo sát
Gia công thử	350-450	0,04-0,06	250-350	60	Kiểm tra rung và đồng bộ; có mức nằm ngoài L9
Miền trung tâm	500-650	0,06-0,10	300-450	60-90	Khảo sát quanh V_c = 550 và F_n = 400; chưa xác nhận biên
Ưu tiên năng suất	650-750	0,10-0,14	350-450	90	So sánh năng suất thực; theo dõi nhiệt và mòn
Ưu tiên chất lượng	450-600	0,04-0,08	300-400	90	Khảo sát lượt tinh; có mức f nằm ngoài L9

DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821

3. Thảo luận

Ảnh hưởng của F_n có hai cơ chế cạnh tranh. Ở tải thấp, khả năng truyền lực tiếp tuyến có thể không đủ, làm tăng trượt hoặc mất tiếp xúc. Khi F_n tăng, khả năng bám tăng nhưng áp suất tiếp xúc và biến dạng cụm gá cũng tăng. Với tiếp xúc đường đàn hồi và hình học không đổi, p_0 tỷ lệ với căn bậc hai của F_n; tăng F_n từ 250 lên 550 N làm p_0 tăng 48,3%, còn tăng từ 300 lên 450 N làm p_0 tăng 22,5%. Đây là tỷ số suy ra từ mô hình Hertz, không phải giá trị áp suất đã tính cho dụng cụ cụ thể. Không thể xác định tải bắt đầu lún dẻo chỉ từ F_n khi chưa biết hình học tiếp xúc và cơ tính.

Sai số bước trước hết phụ thuộc tỷ số vận tốc C–Z. Nếu máy điều khiển vị trí trực tiếp bằng encoder, trượt tại con lăn không tự động tương đương sai số bước; ảnh hưởng của F_n truyền qua biến dạng kết cấu, lực cản và sai số bám servo. Trong cơ cấu truyền chuyển động bằng ma sát, trượt còn có thể làm sai lệch vận tốc thực của phôi hoặc vận tốc chạy dao. Vì vậy, cần đo đồng thời chuyển động thực, lực ép và trượt để phân biệt các cơ chế. Dữ liệu Δp tại ba mức F_n chỉ mô tả xu hướng của bộ minh họa, chưa chứng minh quan hệ nhân quả trên máy.

Mô hình nhiệt cần phân biệt nhiệt do biến dạng phoi, ma sát dao–phoi và ma sát tại thành phần lăn để tránh cộng trùng nguồn nhiệt. MQL có thể ảnh hưởng hệ số ma sát, phân bố nhiệt và điều kiện trao đổi nhiệt; chưa có dữ liệu để tách riêng các đóng góp này. Các nghiên cứu [4]–[6] cung cấp cơ sở lựa chọn mô hình và hiệu chuẩn, không xác nhận trực tiếp cửa sổ V_c–f–F_n–Q của bài báo. Tương tự, chưa có dữ liệu đối chứng để lượng hóa mức giảm mòn, giảm nhiệt hoặc rút ngắn thời gian gia công so với phương pháp truyền thống.

Giới hạn của nghiên cứu là bộ số liệu minh họa chưa kèm bộ hệ số sinh dữ liệu, chưa có thực nghiệm lặp, chưa xác nhận chiều dài đo Δp và chưa xác lập quan hệ giữa f quy đổi với chạy dao tạo đường xoắn. Do đó, các tỷ phần biến thiên và đồ thị chỉ có giá trị mô tả; chưa báo cáo p-value, khoảng tin cậy hoặc phần trăm đóng góp của tương tác. Giai đoạn tiếp theo cần công bố hình học tiếp xúc, đặc tính vật liệu, phương trình và hệ số mô phỏng, điều kiện biên, phương pháp đo và dữ liệu thô để đánh giá khả năng tái lập và độ chính xác dự báo.

4. Kết luận

Bài báo đề xuất khung liên kết động học C–Z, tiếp xúc lăn–trượt và kế hoạch khảo sát lực–nhiệt–chất lượng cho gia công cao tốc rãnh xoắn ngoài. Quan hệ $p = 60v_z/N_w$ cho phép kiểm tra tính nhất quán giữa lượng tiến dọc trục sau một vòng và tốc độ trục; phân tích tiếp xúc chỉ ra yêu cầu cân bằng khả năng bám với áp suất và biến dạng do lực ép.

Từ chín trường hợp minh họa, f chiếm 70,59% biến thiên F_{tb} và 51,86% biến thiên R_a; V_c chiếm 81,60% biến thiên T_{max}; F_n chiếm 61,02% biến thiên Δp. Khi F_n tăng từ

DOI: https://doi.org/10.65153/d3v0h821

250 lên 550 N, Δp trung bình tăng 26,25%; khi Q tăng từ 30 lên 90 mL/h, T_{max} trung bình giảm 30,10 °C. Các kết quả này là thống kê mô tả trên dữ liệu minh họa, chưa phải bằng chứng thực nghiệm hay kiểm định ý nghĩa thống kê.

Miền V_c = 500–650 m/phút, f = 0,06–0,10 mm/vòng quy đổi, F_n = 300–450 N và Q = 60–90 mL/h được đề xuất để khảo sát tiếp quanh các xu hướng thuận lợi của L9. Các biên chưa được kiểm chứng; việc áp dụng cần xác nhận các giới hạn nhám, sai số bước, tải tiếp xúc, nhiệt, rung và khả năng đồng bộ máy. Chưa có cơ sở để công bố mức tăng năng suất hoặc giảm nhiệt và mòn so với phương pháp truyền thống.

Nghiên cứu tiếp theo cần hiệu chuẩn mô hình trên vật liệu và dụng cụ cụ thể, bổ sung thí nghiệm lặp và các điểm xác nhận độc lập, rồi mới xây dựng mô hình đáp ứng và tối ưu nhiều mục tiêu. Việc kết hợp đo lực, nhiệt và chuyển động thực là cần thiết để phân biệt ảnh hưởng của trượt tiếp xúc với sai số đồng bộ C–Z.

5. Tài liệu tham khảo

[1] Altintas, Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design, 2nd ed., Cambridge University Press, 2012.

[2] Budak, E., Altintas, Y., Armarego, E.J.A. “Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 118(2), 216-224, 1996.

[3] Altintas, Y., Lee, P. “A general mechanics and dynamics model for helical end mills”, CIRP Annals, 45(1), 59-64, 1996.

[4] Melkote, S.N., Grzesik, W., Outeiro, J.C., Rech, J., Schulze, V., Attia, H., et al. “Advances in material and friction data for modelling of metal machining”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 66(2), 731-754, 2017.

[5] Abukhshim, N.A., Mativenga, P.T., Sheikh, M.A. “Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(7-8), 782-800, 2006.

[6] Özel, T. “The influence of friction models on finite element simulations of machining”. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(5), 518–530, 2006. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.07.001.

[7] Johnson, K. L. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 1985.

[8] Jaeger, J. C. “Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts”. Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales, 76, 203–224, 1942.