

TỐI ƯU HÓA QUÁ TRÌNH TIỆN CỨNG THÉP HỢP KIM SKD11 BẰNG DAO GỐM CÓ HỖ TRỢ NHIỆT CẢM ỨNG TỪ

OPTIMIZATION OF INDUCTION-ASSISTED TURNING OF HARDENED SKD11 STEEL USING CERAMIC TOOLS

Trần Trọng Thể

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: tnthe@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu tối ưu hóa quá trình tiện cứng thép hợp kim SKD11 sau nhiệt luyện bằng dao gốm có hỗ trợ gia nhiệt cảm ứng từ (IAM). Thiết kế thực nghiệm Box-Behnken với 4 yếu tố đầu vào gồm vận tốc cắt (V), lượng chạy dao (f), chiều sâu cắt (t) và nhiệt độ gia nhiệt (T) được sử dụng để đánh giá các chỉ tiêu đầu ra là lực cắt (F_c), độ nhám bề mặt (R_a) và mòn dao (H_s). Mô hình hồi quy bậc hai và phương pháp bề mặt đáp ứng được áp dụng nhằm xác định biến thiên của các đại lượng công nghệ và thông số tối ưu. Kết quả cho thấy nhiệt độ gia nhiệt có ảnh hưởng đến khả năng giảm lực cắt và ổn định quá trình tạo phoi, vận tốc cắt quyết định đến chất lượng bề mặt gia công. Các ảnh mô phỏng trường nhiệt, trường ứng suất tiếp xúc và biến dạng phoi thể hiện vùng gia nhiệt cục bộ làm giảm tải cơ nhiệt tác dụng lên mặt trước của dao, hỗ trợ bóc tách phoi thuận lợi hơn. Xác định được bộ thông số tối ưu với $V = 220$ m/phút, $f = 0,12$ mm/vòng, $t = 0,35$ mm và $T = 540^\circ\text{C}$ khi gia công sẽ giảm F_c , giảm R_a và hạn chế H_s .

Từ khóa: Tiện cứng; Gia nhiệt cảm ứng từ; Dao gốm; Bề mặt đáp ứng; Tối ưu hóa đa mục tiêu; SKD11.

ABSTRACT

This paper presents a study on optimizing the hard turning process of heat-treated SKD11 alloy steel using ceramic tools with induction heating (IAM). A Box-Behnken experimental design with four input factors-cutting speed (V), feed rate (f), depth of cut (t), and heating temperature (T)-was used to evaluate the output parameters: cutting force (F_c), surface roughness (R_a), and tool wear (H_s). A quadratic regression model and response surface method were applied to determine the variation of technological quantities and optimal parameters. The results show that heating temperature influences the ability to reduce cutting force and stabilize chip formation, while cutting speed determines the surface quality. Simulation images of the thermal field, contact stress field, and chip strain demonstrate the localized heating zone, which reduces the thermomechanical load applied to the tool face, facilitating chip removal. The optimal machining parameters were determined with $V = 220$ m/min, $f = 0.12$ mm/revolution, $t = 0.35$ mm, and $T = 540^\circ\text{C}$, which will reduce F_c , reduce R_a , and limit H_s .

Keywords: Hard turning; Induction-assisted machining; Ceramic tool; Response surface methodology; Multi-objective optimization; SKD11.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Quá trình tiện cứng thép hợp kim sau nhiệt luyện đòi hỏi sự cân bằng chặt chẽ giữa năng suất, chất lượng bề mặt và tuổi bền dụng cụ. Đối với thép SKD11 có độ cứng cao, tải trọng cơ – nhiệt tại vùng cắt tăng nhanh, lực cắt lớn, phoi khó kiểm soát và dao dễ bị sút mẻ. Dao gôm có ưu thế về độ cứng nóng và khả năng chống mài mòn, song bản chất giòn của vật liệu này khiến dao nhạy với ứng suất tiếp xúc lớn và dao động nhiệt cục bộ [1], [4].

Các nghiên cứu trước xác định gia nhiệt hỗ trợ tại vùng cắt làm giảm sức bền cắt của lớp vật liệu bề mặt, giảm lực cắt, cải thiện tính liên tục của quá trình bóc tách phoi và nâng cao chất lượng bề mặt [1], [3], [5]. Gia nhiệt cảm ứng từ tập trung năng lượng vào vùng làm việc, thời gian đáp ứng nhanh và phù hợp với tích hợp trên hệ thống máy công cụ. Khi tiện kết hợp với dao gôm và IAM thì điều kiện làm việc ổn định tại vùng tiếp xúc dao – phôi, hạn chế khả năng nứt vỡ dụng cụ do sốc cơ – nhiệt.

Nghiên cứu này, tối ưu hóa quá trình tiện có hỗ trợ nhiệt cảm ứng từ gia công thép SKD11 bằng dao gôm bằng dữ liệu thực nghiệm và mô phỏng. Bài báo phân tích ảnh hưởng của V , f , t và T đến F_c , R_a và H_s ; sử dụng mô hình hồi quy bậc hai, bề mặt đáp ứng và mô phỏng để xác định bộ thông số công nghệ tối ưu.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu và cấu hình thí nghiệm

Vật liệu phôi là thép hợp kim SKD11 có độ cứng 58–60 HRC, dụng cụ cắt Al_2O_3 phủ TiN, hỗ trợ nhiệt IAM với dải tần 20–40 kHz và miền nhiệt độ 350–600°C. Thiết kế thực

nghiệm được xây dựng theo Box-Behnken với 4 yếu tố, 3 mức với tổng 27 tổ hợp thí nghiệm. Các chỉ tiêu đánh giá gồm F_c , R_a và H_s , trong khi Minitab để phân tích hồi quy và DEFORM-3D dùng mô phỏng trường nhiệt – cơ học tại vùng cắt.

Bảng 1. Điều kiện và các đại lượng nghiên cứu

Nội dung	Giá trị/miền khảo sát
Vật liệu phôi	SKD11 sau tôi, 58–60 HRC
Dụng cụ cắt	Dao gôm Al_2O_3 phủ TiN
Hệ gia nhiệt IAM	Cuộn cảm 5 vòng
Dải tần nguồn	20–40 kHz
Nhiệt độ khảo sát	350–600°C
Thiết kế thực nghiệm	27 thí nghiệm
Đầu ra theo dõi	F_c , R_a , H_s
Phần mềm phân tích	Minitab; DEFORM-3D

2.2. Phương pháp xử lý số liệu và tối ưu hóa

Quan hệ giữa các biến đầu vào và các đáp ứng đầu ra mô tả bằng mô hình hồi quy bậc hai:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j$$

Trong đó: Y là đáp ứng cần dự đoán; x_i là các biến mã hóa tương ứng với V , f , t và T ; β_0 , β_i , β_{ii} và β_{ij} là các hệ số hồi quy của mô hình. Đối với bài toán tối ưu hóa nhiều mục tiêu để giảm đồng thời F_c , R_a và H_s sử dụng:

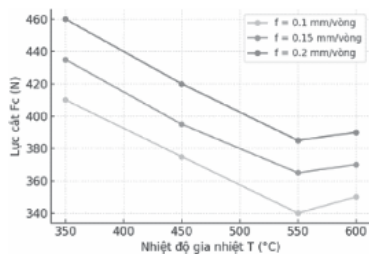
$$D = (d_{F_c} \times d_{R_a} \times d_{H_s})^{(1/3)}$$

Giá trị D càng lớn thì tổ hợp thông số công nghệ càng có chất lượng cao. Mô hình hồi quy lực cắt F_c đạt hệ số xác định $R^2 = 0,97$ với $p < 0,01$ thể hiện sự biến thiên của lực cắt trong miền nghiên cứu.

3. KẾT QUẢ

3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ gia nhiệt và lượng chạy dao đến lực cắt

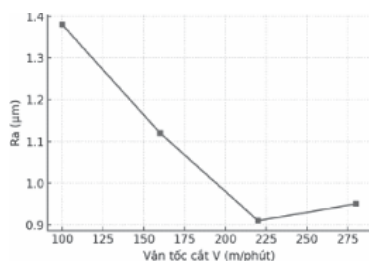
Hình 1 thể hiện xu hướng biến thiên của F_c theo T tại ba mức f . Khi nhiệt độ tăng từ 350°C lên 550°C, F_c giảm ở cả ba mức f ; sau ngưỡng này, F_c tăng nhẹ trở lại tại 600°C. Ở mức $f = 0,10$ mm/vòng, F_c giảm xấp xỉ từ 410 N còn 340 N; tại $f = 0,20$ mm/vòng, F_c giảm từ 460 N xuống 385N. Kết quả xác định T làm giảm sức cản cắt, f làm gia tăng tải trọng cơ học lên hệ thống cắt.



Hình 1. Ảnh hưởng của T và f đến F_c

Gia tăng nhiệt độ tại lớp kim loại bề mặt làm giảm ứng suất chảy cục bộ của phôi, quá trình bóc tách phoi thuận lợi hơn và áp lực pháp tuyến lên mặt trước của dao giảm xuống. Khi nhiệt độ tăng quá cao thì dao và phôi gia công làm việc trong miền nhiệt cao sẽ giảm ổn định tiếp xúc là nguyên nhân của xu hướng tăng nhẹ F_c ở 600°C.

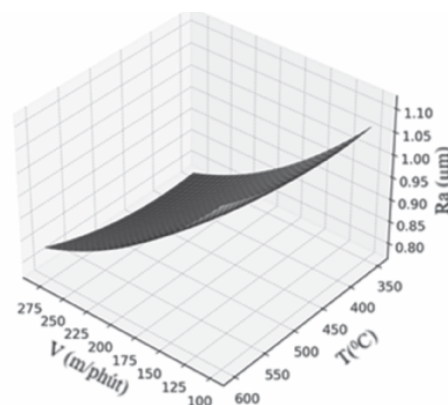
3.2. Ảnh hưởng của vận tốc cắt và nhiệt độ đến độ nhám bề mặt



Hình 2. Ảnh hưởng của V đến Ra

Hình 2 cho thấy Ra giảm khi tăng V từ 100 lên 220 m/phút, sau đó tăng tại 280 m/phút. Giá trị Ra giảm từ 1,38 μm xuống 0,91 μm khi V tăng đến 220 m/phút phản ánh sự chuyển tiếp từ trạng thái tạo phoi kém ổn định sang trạng thái cắt êm hơn, bề mặt sau gia công đồng đều hơn. Khi tiếp tục tăng V lên 280 m/phút, Ra tăng lên 0,95 μm gây ảnh hưởng bất lợi của nhiệt cắt và dao động hệ thống ở miền tốc độ cao.

Hình 3 thể hiện tương tác giữa V và T đối với Ra . Bề mặt đáp ứng V là biến chi phối mạnh hơn, T điều chỉnh miền làm việc ổn định. Vùng Ra thấp hình thành ở miền V tương đối cao kết hợp với vùng T trung bình đến cao, phù hợp xu hướng tối ưu trong bài toán đa mục tiêu.

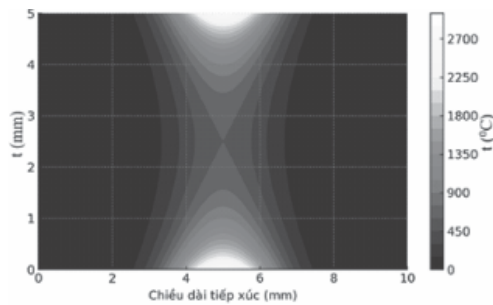


Hình 3. Biểu đồ bề mặt đáp ứng RSM của Ra theo V và T

3.3. Phân tích trường nhiệt, ứng suất và biến dạng phoi

Mô phỏng số vùng cắt sử dụng diễn giải vai trò của IAM trong quá trình tiện cứng bằng dao gốm (Hình 4). Vùng làm việc hiệu quả trong khoảng 450–550°C tạo ra miền nhiệt ổn định quanh khu vực tiếp xúc dao – phôi làm giảm sức bền cắt của lớp vật liệu bị bóc tách nhưng chưa vượt quá phạm vi công nghệ của nghiên cứu.

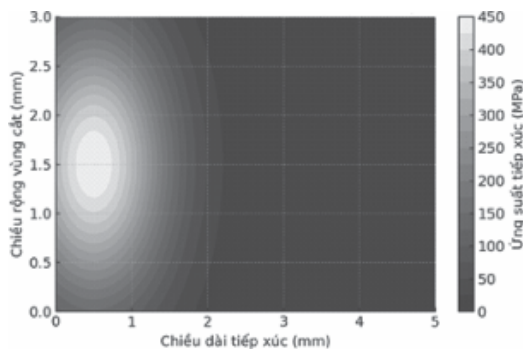




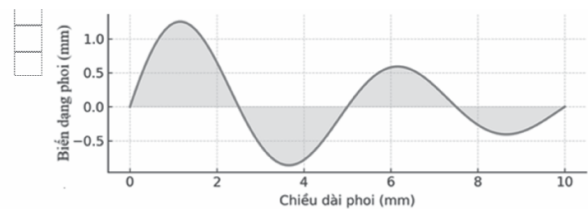
Hình 4. Phân bố nhiệt độ vùng cắt trong quá trình tiện có hỗ trợ nhiệt cảm ứng từ

Hình 5 thể hiện ứng suất tiếp xúc lớn nhất tập trung ở mũi dao, sau đó giảm nhanh theo chiều dài tiếp xúc. Quy luật này phù hợp với bản chất truyền tải lực trên mặt trước dụng cụ, vùng gần điểm vào cắt chịu tải pháp tuyến và ma sát lớn nhất, các vùng phía sau đóng vai trò dẫn hướng phoi. Miền gia nhiệt cục bộ làm suy giảm mức ứng suất cực đại tại vùng tiếp xúc, hỗ trợ giảm nguy cơ nứt mẻ dao gôm.

Hình 6 mô tả biến dạng phoi trong quá trình bóc tách dưới tác dụng của tải cơ học và nguồn nhiệt cảm ứng. Phoi hình thành theo dạng gợn sóng phi tuyến, biên độ uốn giảm dần về cuối chiều dài phoi phản ánh quá trình phân đoạn phoi vẫn tồn tại nhưng đều hơn nhờ tác động làm mềm cục bộ của nhiệt. So với trạng thái tiện cứng không hỗ trợ nhiệt, IAM tạo điều kiện để phoi tách ra ổn định hơn và giảm xu hướng tích tụ tải trọng đột ngột trên lưỡi cắt.



Hình 5. Phân bố trường ứng suất tiếp xúc trên mặt dao trong quá trình tiện có IAM



Hình 6. Mô phỏng biến dạng phoi khi tiện có IAM

4. TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU

Trên cơ sở đồng thời giảm F_c , R_a và H_s bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu bộ thông số công nghệ ở miền V trung bình – cao, f nhỏ, t trung bình và T khoảng 540°C đảm bảo lợi ích giữa năng suất gia công, chất lượng bề mặt, độ bền dụng cụ và phù hợp xu hướng biến thiên trên các đồ thị và mô phỏng.

Bảng 2. Bộ thông số tối ưu

Thông số đầu vào	Giá trị tối ưu
Vận tốc cắt V (m/phút)	220,0
Lượng chạy dao f (mm/vòng)	0,12
Chiều sâu cắt t (mm)	0,35
Nhiệt độ T ($^\circ\text{C}$)	540,0

Kết quả ở Bảng 2, nhận thấy miền tối ưu không trùng với giá trị cực hạn của từng yếu tố riêng lẻ, mà là nghiệm cân bằng giữa các đáp ứng công nghệ. Vận tốc cắt 220 m/phút tương ứng với vùng R_a đạt mức thấp; lượng chạy dao 0,12 mm/vòng duy trì lực cắt ở mức vừa phải; chiều sâu cắt 0,35 mm bảo đảm ổn định bóc tách vật liệu; còn nhiệt độ 540°C tạo hiệu ứng gia nhiệt đủ mạnh để giảm lực cắt mà vẫn giữ hệ thống làm việc ổn định.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu làm cơ sở thực nghiệm, mô phỏng cho quá trình tiện cứng thép SKD11 bằng dao gôm có hỗ trợ nhiệt cảm ứng từ. Kết quả xác định nhiệt độ gia nhiệt làm giảm lực

cắt, cải thiện quá trình hình thành phoi và giảm tải cơ nhiệt trên bề mặt dụng cụ.

Vận tốc cắt chi phối mạnh đối với chất lượng bề mặt. Trong miền khảo sát, Ra giảm khi tăng V đến khoảng 220 m/phút, sau đó tăng nhẹ khi tiếp tục nâng V. Các kết quả mô phỏng trường nhiệt, trường ứng suất và biến dạng phoi đều xác định IAM làm thay đổi tích cực trạng thái tương tác dao – phoi trong tiện cứng.

Bộ thông số tối ưu là $V = 220$ m/phút, $f = 0,12$ mm/vòng, $t = 0,35$ mm và $T = 540^{\circ}\text{C}$ áp dụng vào quá trình tiện sẽ giảm lực cắt, cải thiện độ nhám bề mặt và hạn chế mòn dao, mở rộng tiềm năng ứng dụng dao gốm trong gia công thép hợp kim cứng. ❖

Ngày nhận bài: **02/3/2026**

Ngày phản biện: **09/3/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. J. C. Outeiro, D. Umbrello, and R. M'Saoubi, "Experimental and numerical modeling of dry hard turning using ceramic tools". CIRP Annals, vol. 61, no. 1, pp. 109–112, 2012.
- [2]. Y. Guo and R. Shivpuri, "Prediction of chip morphology and segmentation in hard turning using FEM". Journal of Materials Processing Technology, vol. 150, no. 1–2, pp. 135–144, 2004.
- [3]. B. Denkena, D. Boehnke, and L. Dege, "Influence of inductive heating on surface integrity during hard turning". Production Engineering, vol. 2, pp. 29–35, 2008.
- [4]. Z. Cai and Q. Yuan, "Cutting performance of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ ceramic tools in high speed machining of hardened steels". Materials and Manufacturing Processes, vol. 28, no. 3, pp. 313–318, 2013.
- [5]. H. Hocheng and C. Y. Tsao, "Comprehensive analysis of machining performance in laser-assisted turning of hard materials". International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 52, no. 1, pp. 1–9, 2012.