

PHÂN TÍCH SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ LÊN LỰC CẮT TRONG QUÁ TRÌNH GIA CÔNG PHAY

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS ON CUTTING FORCE IN MILLING PROCESSES

Võ Anh Tuấn¹, Lê Đức Chương¹, ThS. Nguyễn Đức Thịnh², TS. Phạm Phương Tùng¹,
PGS, TS. Nguyễn Quốc Chí¹

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²Khoa Kỹ thuật, Trường Đại học Việt Đức

Email: nqchi@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Việc hiểu rõ ảnh hưởng của các tham số vận hành và đặc điểm vật liệu đối với lực cắt là điều cần thiết để tối ưu hóa quy trình gia công CNC. Nghiên cứu này phát triển một mô hình lực cắt sử dụng lý thuyết của Oxley kết hợp với mô hình dòng chảy Johnson-Cook. Mô hình được phát triển được kiểm tra thông qua dữ liệu thực nghiệm của một công bố trước đó. Mô hình này cho phép ước lượng lực cắt một cách hiệu quả mà không cần thiết bị đo lực đắt tiền. Bên cạnh đó, bằng cách sử dụng mô hình này, độ nhạy của các yếu tố gia công như tốc độ cắt, lượng tiến dao và đặc tính vật liệu đối với lực cắt được nghiên cứu. Việc phân tích này là bước quan trọng để nâng cao hiệu quả, độ chính xác và độ bền của quá trình gia công trong thực tiễn.

Từ khóa: *Phay CNC; Lực cắt; Lý thuyết Oxley; Mô hình dòng chảy Johnson-Cook; Phân tích độ nhạy.*

ABSTRACT

Understanding the influence of operational parameters and material properties on cutting forces is essential for optimizing CNC machining processes. This study develops a cutting force model based on Oxley's theory and the Johnson-Cook flow model. The proposed model is validated using experimental data from a previous publication. It enables efficient estimation of cutting forces without the need for expensive force measurement equipment. Additionally, by utilizing this model, the sensitivity of machining parameters such as cutting speed, feed rate, and material characteristics to cutting forces is investigated. This analysis serves as a crucial step towards improving the efficiency, accuracy, and durability of machining processes in practical applications.

Keywords: *CNC milling; Cutting force; Oxley's theory; Johnson-Cook flow model; Sensitivity analysis.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dự báo lực cắt ngày càng trở nên quan trọng với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ gia công CNC. Việc sản xuất chính xác cao, thường với độ chính xác ở mức micromet, đòi hỏi kiểm soát chặt chẽ các thông số gia công. Trong số đó, hao mòn dụng cụ là yếu tố then chốt ảnh hưởng đến độ chính xác kích thước và độ bóng của bề mặt. Khi dụng cụ hao mòn, lực cắt tăng lên, gây ra các sai lệch ngoài giới hạn cho phép và làm giảm chất lượng bề mặt gia công. Việc dự đoán và giám sát chính xác lực cắt, kết hợp giữa các mô hình lý thuyết đã được xác thực và dữ liệu từ cảm biến, cung cấp một phương pháp thực tiễn để phát hiện hao mòn dụng cụ và nâng cao kết quả gia công.

Lực cắt bắt nguồn từ ba cơ chế chính: lực kháng lại biến dạng đàn hồi của vật liệu, lực kháng lại biến dạng dẻo trong quá trình cắt gọt, và lực ma sát giữa phoi và các bề mặt của dụng cụ - đặc biệt là mặt cạnh răng, mặt chuyển tiếp của vật gia công, và mặt bên của dụng cụ.

Lực cắt đóng một vai trò quan trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến độ nhám bề mặt gia công và độ mòn dụng cụ cắt [1]. Dimla và Lister [2] phát triển một hệ thống giám sát tình trạng dụng cụ dựa trên mô hình phân tích tín hiệu cảm biến trực tuyến. Họ sử dụng ba thành phần của lực cắt và dữ liệu dao động (được đo bởi gia tốc kế) để đánh giá độ mòn dụng cụ thông qua phân tích miền thời gian và phân tích miền tần số.

Trong suốt quá trình phát triển của mô hình lực cắt trong gia công, có ba phương pháp chính để mô hình hóa lực cắt: phương pháp thực nghiệm [3], phương pháp số [4], và phương pháp phân tích [5]. Phương pháp thực nghiệm đo lực cắt trực tiếp bằng dụng cụ đo lực, dựa

trên nhiều thử nghiệm, dữ liệu thu được được xử lý bằng các phương pháp toán học để xác định công thức thực nghiệm tính lực cắt. Ví dụ, trong [3], mô hình cắt được xây dựng dựa trên phương pháp này: các thử nghiệm cắt diễn ra với các điều kiện gia công được giữ cố định, chỉ thay đổi độ sâu cắt, và dữ liệu lực cắt theo các giá trị khác nhau của độ sâu cắt được đo bằng cảm biến lực dynamometer. Nhược điểm lớn nhất của phương pháp này là mô hình chỉ đúng trong một số trường hợp cụ thể, đồng thời chi phí thử nghiệm cao do yêu cầu nhiều lần thực hiện. Trong khi đó, phương pháp số tập trung vào mô phỏng sự tương tác giữa dụng cụ và vật liệu gia công và các hiện tượng thay đổi về nhiệt độ và ứng suất trong quá trình gia công. Chìa khóa của phương pháp này là sử dụng kỹ thuật phân tử hữu hạn để mô phỏng quá trình gia công và dự đoán lực cắt. So với phương pháp thực nghiệm, phương pháp số cho ra các mô hình với đa dạng điều kiện hơn, song lại tiêu tốn nhiều thời gian và cần sử dụng các phần mềm mô phỏng thương mại có chi phí cao.

Khác với hai phương pháp trên, phương pháp phân tích xây dựng các mô hình dự đoán lực cắt dựa trên lý thuyết cắt và cơ học cắt. Phương pháp này cho phép đặc trưng hóa quá trình gia công, giúp nâng cao hiểu biết về bản chất của quá trình cắt. Thông qua đó, các cơ chế loại bỏ vật liệu và hành vi ứng xử của dụng cụ cắt và vật liệu trong vùng biến dạng có thể được nghiên cứu kỹ, tạo điều kiện thuận lợi cho việc tối ưu hóa quá trình gia công.

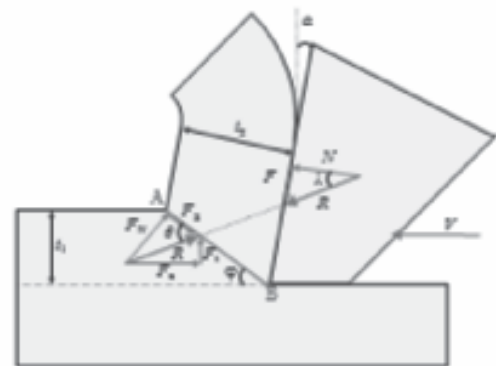
Phương pháp phân tích dự đoán lực cắt trong gia công kim loại dựa trên lý thuyết trượt. Các phương pháp này thường được chia thành ba cách tiếp cận chính. Thứ nhất là mô hình mặt cắt trượt, do Merchant đề xuất [6], giúp đơn giản hóa quá trình bằng cách giả định phoi hình thành và trượt dọc theo một mặt cắt trượt duy nhất 

nhất dựa trên nguyên tắc năng lượng tối thiểu. Thứ hai là mô hình trường trượt, được Lee và Shaffer giới thiệu năm 1949 [7], sử dụng lý thuyết trượt và cơ học biến dạng dẻo để phân tích cắt trực giao, xem xét các hiện tượng như hình thành phoi cuộn và dòng chảy vật liệu trong toàn bộ vùng biến dạng dẻo. Tuy nhiên, độ phức tạp của các đường trượt siêu nhỏ khiến phương pháp này ít khả thi trong thực tế để dự đoán lực, do đó nhiều nhà nghiên cứu ưu tiên sử dụng phương pháp đơn giản hơn dựa trên mặt cắt trượt thẳng cho các quá trình gia công khác nhau. Phương pháp thứ ba là mô hình vùng cắt trượt, do Oxley phát triển [8], trong đó xem xét biến dạng dẻo trong một dải hẹp có chiều dày xác định (Hình 1), bao gồm các yếu tố như biến dạng, tốc độ biến dạng, độ cứng do biến dạng và nhiệt độ. Phương pháp này phản ánh điều kiện gia công thực tế hơn và được đánh giá cao trong dự đoán lực cắt chính xác. Trong những nghiên cứu trên, lý thuyết của Oxley được áp dụng song song với mô hình dòng chảy Johnson-Cook để phân tích ảnh hưởng của đặc tính vật liệu và điều kiện gia công đến hành vi lực cắt trong gia công phay CNC.

Trong bài báo này, một mô hình dự đoán lực cắt dựa trên nền tảng lý thuyết của Oxley kết hợp với mô hình dòng chảy Johnson-Cook được xây dựng, nhằm nâng cao khả năng dự báo chính xác các đặc trưng của quá trình gia công. Đồng thời, mô hình này còn được sử dụng để phân tích độ nhạy của các yếu tố gia công như tốc độ cắt, lượng tiến dao và đặc tính vật liệu đối với lực cắt, từ đó làm rõ ảnh hưởng của từng yếu tố đến hiệu suất gia công. Mô hình được xác thực bằng cách so sánh với dữ liệu thực nghiệm từ các công bố khoa học trước đây, góp phần củng cố tính khả thi và độ tin cậy của phương pháp nghiên cứu.



Hình 1. Các vùng biến dạng được giả định trong mô hình vùng cắt trượt của Oxley



Hình 2. Quá trình biến dạng của phoi

2. MÔ HÌNH ĐA VẬT LÝ CHO QUÁ TRÌNH GIA CÔNG CNC

Trong chương này, một mô hình đa vật lý mô tả quá trình gia công của máy phay CNC được xây dựng nhằm dự đoán lực cắt. Phương pháp được sử dụng ở đây là vận dụng lý thuyết của Oxley và mô hình Johnson and Cook để xác định góc mặt phẳng trượt ϕ ; tỷ lệ giữa chiều dài mặt phẳng trượt AB và độ dày vùng biến sơ cấp $l/\Delta s_2$ (vùng màu xanh dương trong Hình 1), được thể hiện bởi C_0 và δ đại diện tỷ lệ của độ dày vùng biến dạng thứ cấp và chiều dày phoi (vùng màu xanh lá trong Hình 1) $\Delta s_2/t_2$. Các góc và lực sử dụng trong mô hình được mô tả tại Hình 2.

2.1. Phân tích ứng xử trên mặt phẳng AB

Với lý thuyết von Mises, k_{AB} được tính toán theo phương trình:

$$k_{AB} = \frac{\sigma_{AB}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (A + B \cdot \epsilon_{AB}^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\epsilon_{AB}}{\epsilon_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T_{AB} - T_w}{T_m - T_w}\right)^m\right) \quad (1)$$

Trong đó: A, B, C, D, n và m đại diện cho các hằng số của vật liệu; σ là ứng suất chảy của vật liệu; ϵ , $\dot{\epsilon}$ và $\dot{\epsilon}_0$ lần lượt là các giá trị biến dạng tương đương, tốc độ biến dạng tương đương và tốc độ biến dạng tham chiếu. Nhiệt độ tức thời được đại diện bởi T; T_w là nhiệt độ khởi tạo ban đầu hay còn được gọi là nhiệt độ phòng; nhiệt độ nóng chảy của vật liệu là T_m . Góc giữa mặt phẳng cắt và lực tổng hợp R được thể hiện qua:

$$\tan(\theta) = 1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) - C_o \cdot \frac{n \cdot B \cdot \epsilon_{AB}^n}{(A + B \cdot \epsilon_{AB}^n)} \quad (2)$$

$$\theta = \phi + \lambda - \alpha \quad (3)$$

Vì AB có vị trí tại trung tâm của mặt phẳng cắt sơ cấp, do vậy biến dạng trượt tại AB bằng một nửa biến dạng trượt tại vùng của mặt phẳng sơ cấp này:

$$\dot{\gamma}_{AB} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\phi) \cdot \cos(\phi - \alpha)} \quad (4)$$

Theo Oxley, tốc độ biến dạng trượt trung bình dọc theo AB, $\dot{\gamma}_{AB}$, tỷ lệ thuận với tốc độ trượt và tỷ lệ nghịch với chiều dài của đoạn AB, l:

$$\dot{\gamma}_{AB} = \frac{C_o \cdot V_s}{l} \quad (5)$$

Phương trình thể hiện độ biến dạng và tốc độ biến dạng với lý thuyết von Mises là:

$$\epsilon_{AB} = \frac{\gamma_{AB}}{\sqrt{3}} \quad \text{và} \quad \dot{\epsilon}_{AB} = \frac{\dot{\gamma}_{AB}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Nhiệt độ trung bình dọc theo AB là:

$$T_{AB} = T_w + \eta \cdot \Delta T_{SZ} \quad (7)$$

Gọi η là phần trăm năng lượng sinh ra từ biến dạng trượt được chuyển hóa thành nhiệt cảm nhận được (trong nghiên cứu này $\eta = 0.9$). Nhiệt độ tăng lên tại vùng cắt sơ cấp ΔT_{SZ} được xác định bởi công biến dạng dẻo được sinh ra trong vùng trượt. $F_s V_s$ là công biến dạng được sinh ra trong vùng này, với F_s là lực cắt; V_s là tốc độ trượt. Khối lượng phoi được xác định: $m_{chip} = \rho V t_l w$, trong đó ρ là khối lượng riêng của vật liệu; V là tốc độ cắt; t_l là chiều dày phoi chưa bị biến dạng và w thể hiện chiều rộng cắt.

$$\Delta T_{SZ} = \frac{(1 - \beta) \cdot F_s \cdot V_s}{m_{chip} \cdot C_p} \quad (8)$$

Gọi β là phần nhiệt được truyền vào phoi và được xác định như sau:

$$\begin{aligned} \beta &= 0.5 - 0.35 \cdot \log_{10}(R_T \cdot \tan \phi) \\ &\text{if } 0.04 \leq R_T \cdot \tan \phi \leq 10 \\ \beta &= 0.3 - 0.15 \cdot \log_{10}(R_T \cdot \tan \phi) \\ &\text{if } R_T \cdot \tan \phi > 10 \end{aligned} \quad (9)$$

Trong đó, hệ số $R_T = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot t_l / K$. Ứng suất pháp tuyến tại B, σ'_N , được xác định bởi:

$$\sigma'_N = k_{AB} \left(1 + \frac{\pi}{2} - 2\alpha - 2C_o n_{eq}\right) \quad (10)$$

2.2. Phân tích ứng xử trên mặt tiếp xúc giữa dao và phôi

Vùng biến dạng dẻo tại bề mặt tiếp xúc giữa dao và phoi được xấp xỉ là vùng biến dạng dẻo hình chữ nhật với chiều dày trung bình là $\Delta s_1 = \delta t_2$, tốc độ biến dạng tương đương cực đại tại vùng tiếp xúc dao và phoi với tiêu chí von Mises được thể hiện qua:



$$\dot{\epsilon}_{int} = \frac{\dot{\gamma}_{int}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_c}{\delta \cdot t_2} \quad (11)$$

Lấy mô men của ứng suất pháp tuyến trên AB quanh điểm B, chiều dài vùng tiếp xúc giữa dao và phoi là:

$$h = \frac{t_1 \cdot \sin \theta}{\cos \lambda \cdot \sin \phi} \cdot \left(1 + \frac{C_o n_{eq}}{3(1+2(\frac{\pi}{4}-\phi)-C_o n_{eq})} \right) \quad (12)$$

Giả sử ứng suất pháp dọc theo mặt tiếp xúc của dao và phoi được phân bố đồng nhất, ứng suất pháp tại điểm B có thể được tính theo $\sigma_N = N/hw$. Nhiệt độ trung bình tại bề mặt tiếp xúc dao và phoi được tính theo công thức:

$$T_{int} = T_w + \Delta T_{SZ} + \psi \Delta T_M \quad (13)$$

Trong đó, ΔT_{SZ} là nhiệt độ tăng lên tại vùng biến dạng cắt, ΔT_M là lượng nhiệt độ tăng tối đa tại vùng tiếp xúc dao và phoi, phần nhiệt truyền tới vùng tiếp xúc trong phân tích này được đại diện bởi $\psi = 0.9$.

$$\log_{10} \frac{\Delta T_M}{\Delta T_C} = 0.06 - 0.195(\delta) \sqrt{\frac{R_T \cdot t_2}{t_1}} + 0.5 \log_{10} \left(\frac{R_T t_2}{h} \right) \quad (18)$$

Trong đó, $\Delta T_C = FV_c / m_{chip} C_p$ là nhiệt độ tăng trung bình trong phoi. Biến dạng trượt cực đại tại vùng tiếp xúc dao – phoi:

$$\gamma_M = \frac{h}{\delta t_2} \quad (14)$$

Biến dạng tương đương tại vùng tiếp xúc dao – phoi:

$$\epsilon_{int} = \frac{\gamma_{int}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} (2\gamma_{AB} + 0.5\gamma_M) \quad (15)$$

Ứng suất chảy tại vùng tiếp xúc dao – phoi được xác định sau khi độ biến dạng và tốc độ biến dạng tại vùng này được xác định:

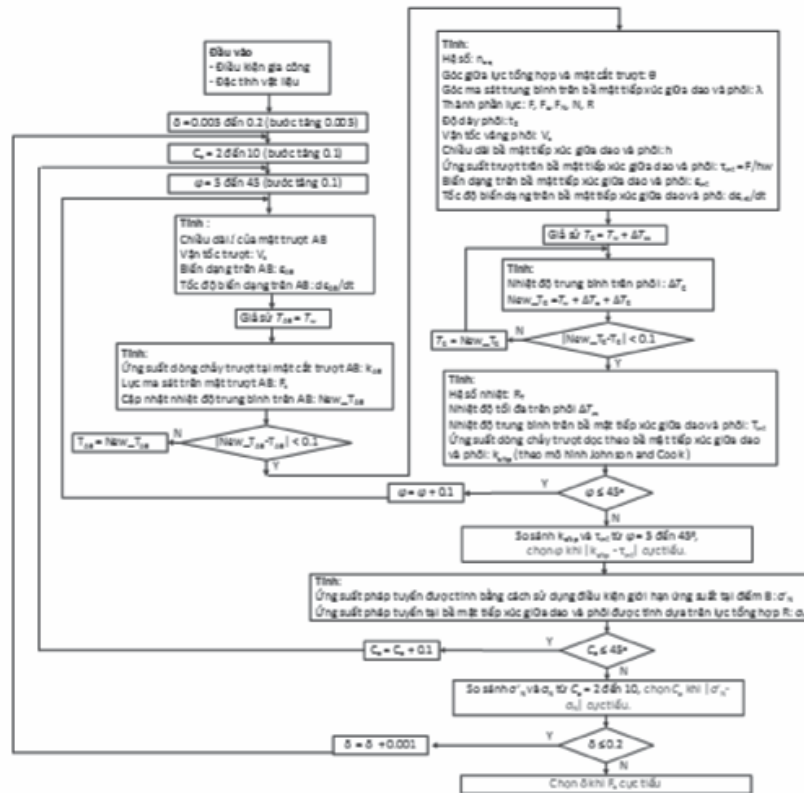
$$k_{chip} = \frac{1}{\sqrt{3}} (A + B \epsilon_{int}^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_{int}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T_{int} - T_w}{T_m - T_w} \right)^m \right) \quad (16)$$

Lực cắt được xác định qua sơ đồ giải thuật tại Hình 3. Góc trượt ϕ được lựa chọn khi ứng suất trượt τ_{int} bằng với ứng suất chảy k_{chip} của vật liệu phoi tại điểm tiếp xúc. Khi ứng suất pháp tại vùng dao – phoi σ_N bằng với σ'_N , giá trị C_o được xác định. Giá trị δ được lựa chọn tại vòng lặp có lực cắt thấp nhất.

3. KIỂM TRA MÔ HÌNH LỰC CẮT

Một chương trình dự đoán lực cắt được xây dựng trên Matlab, sử dụng lưu đồ được giới thiệu ở Mục 2. Kết quả dự đoán lực cắt từ chương trình sẽ được đối chiếu với dữ liệu thực nghiệm đã được công bố [9], nhằm kiểm tra độ chính xác của mô hình lực cắt.

Trong mô phỏng này, dao phay gán mảnh với hai lưỡi được sử dụng. Quá trình gia công được thực hiện trên phôi thép AISI 4340, độ cứng 47 ± 1 HRC. Các tham số đầu tiên liên quan đến tính chất vật liệu gồm: ứng suất chảy A và ứng suất cứng hóa B lần lượt là 950 MPa và 750 MPa; hệ số cứng hóa biến dạng C, hệ số phần trăm cứng hóa theo tốc độ biến dạng n, và hệ số làm mềm nhiệt m lần lượt bằng 0.015, 0.375, và 0.625; tốc độ biến dạng tham chiếu $\dot{\epsilon}_0$ bằng 3500; nhiệt độ nóng chảy T_m là 635°C ; nhiệt dung riêng C_p bằng 477 J/kgK; hệ số dẫn nhiệt K là 45.5 W/mK. Các điều kiện vận hành cũng được xác định dựa trên các tham số cắt gọt như đường kính dụng cụ D bằng 20 mm, góc thoát phôi của dao α là 14.5° ; tốc độ tiến dao 800 mm/phút độ sâu cắt trục là 1 mm. Kết quả so sánh trong Hình 4 cho thấy lực cắt dự đoán tương đối trùng khớp với dữ liệu thực nghiệm. Điều này cho thấy tính chính xác cao của mô hình dự đoán.

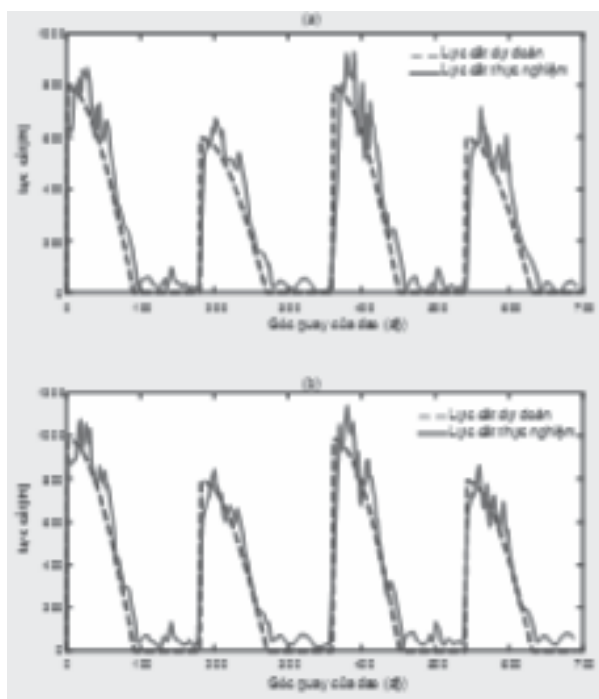


Hình 3. Sơ đồ giải thuật dự đoán lực cắt với lý thuyết Oxley áp dụng vào mô hình ứng suất chảy Johnson và Cook

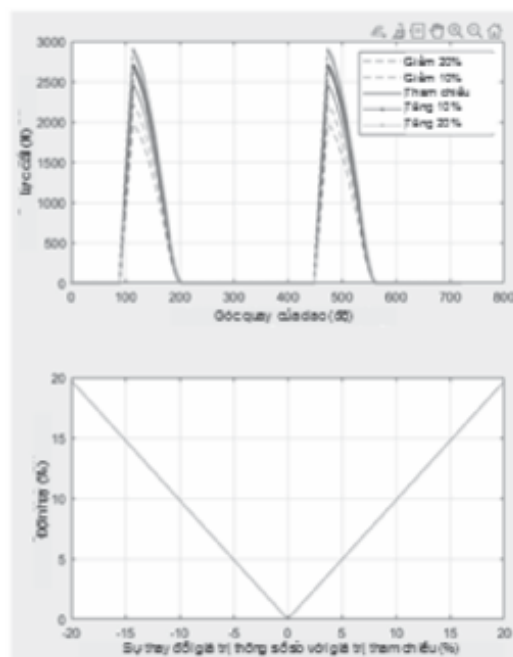
4. PHÂN TÍCH VỀ ĐỘ NHẠY CỦA CÁC THÔNG SỐ

Dựa trên mô hình lực cắt đã được kiểm chứng ở Mục 3, mức độ ảnh hưởng của từng biến đầu vào đến kết quả đầu ra của mô hình lực cắt đánh giá. Cụ thể là phân tích độ nhạy của các thông số cắt gọt và đặc tính vật liệu, điều này giúp xác định những yếu tố có tác động lớn nhất đến lực cắt. Đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố về điều kiện gia công đến lực cắt được mô tả trong các hình 5 và 6, trong khi đó, tác động của sự thay đổi về đặc tính vật liệu đến kết quả ước lượng lực cắt được trình bày trong hình 7 và 8. Hình 9 cho thấy một cái nhìn tổng quát về độ nhạy của lực cắt với các sự thay đổi của tham số đầu vào.

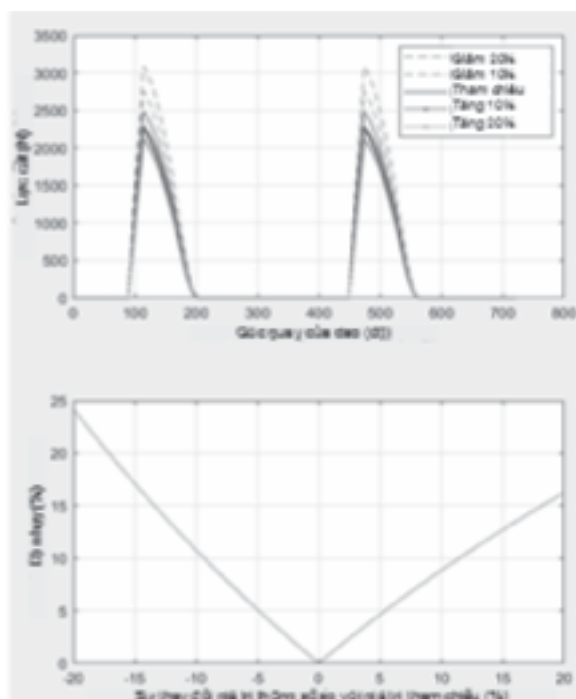
Dựa trên đồ thị độ nhạy Hình 9, có thể rút ra rằng sự thay đổi tốc độ quay dao, tốc độ tiến dao, và góc thoát phoi ảnh hưởng đáng kể đến lực cắt. Điều này cho thấy chúng có độ nhạy cao đối với lực cắt, đồng thời là những tham số cần được kiểm soát chặt chẽ trong quá trình gia công để đảm bảo hiệu suất tối ưu. Bên cạnh đó, các yếu tố vật liệu trong mô hình Johnson-Cook như ứng suất (A, B), và hệ số phần trăm cứng hóa theo tốc độ biến dạng (n), cũng ảnh hưởng mạnh đến lực cắt. Đây là những yếu tố tương đối khó xác định chính xác trên thực tế, vì chúng phụ thuộc rất nhiều vào chất lượng vật liệu của phôi. Việc có sai số khi xác định các yếu tố này có thể ảnh hưởng nghiêm trọng đến kết quả dự đoán lực cắt. Ngược lại, sự thay đổi trong hệ số cứng hóa biến dạng (C), và tốc độ biến dạng tham chiếu ít ảnh hưởng đến lực cắt. 



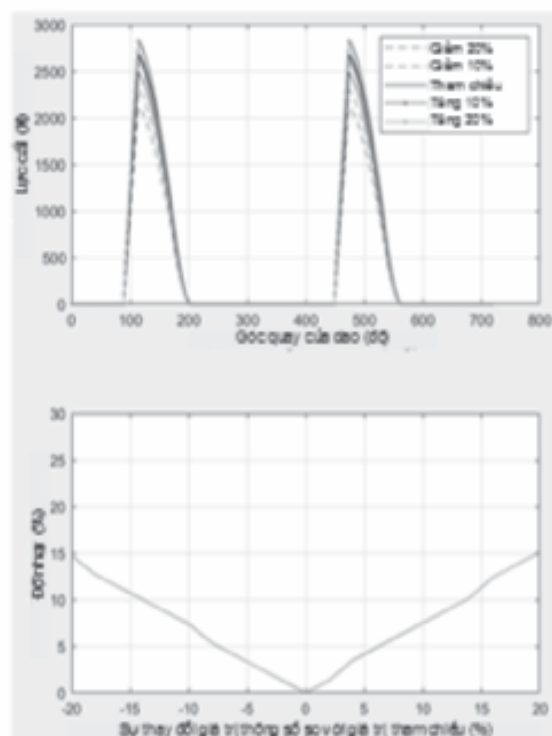
Hình 4. Kết quả so sánh của mô hình lực cắt với tốc độ cắt khác nhau: a) 125 m/phút và b) 100 m/phút



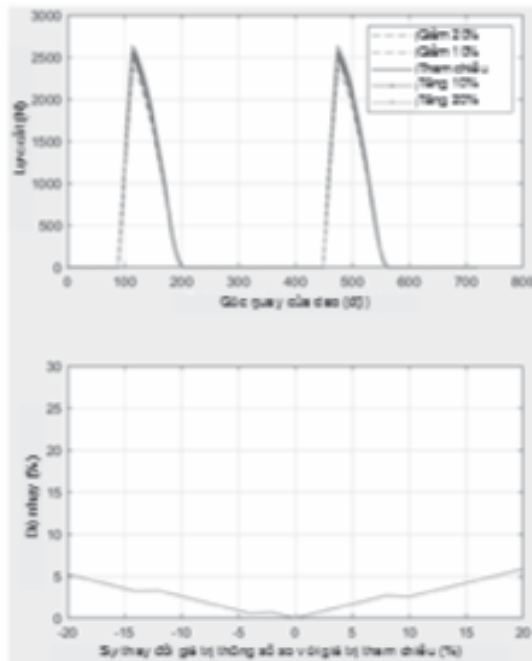
Hình 6. Tác động của sự thay đổi tốc độ tiến dao đến lực cắt (tốc độ tiến dao tham chiếu là 800 mm/phút)



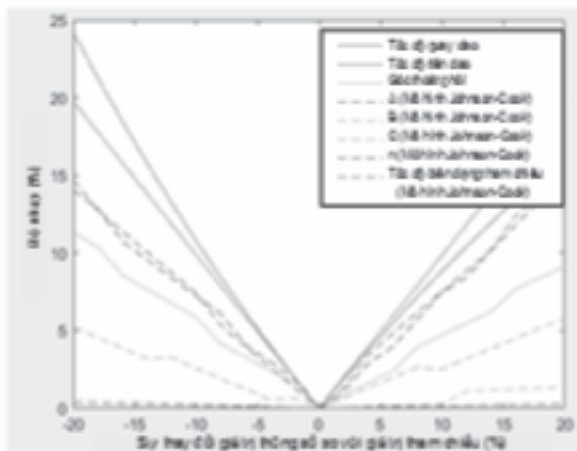
Hình 5. Tác động của sự thay đổi tốc độ quay của trục chính (hay tốc độ cắt) đến lực cắt (tốc độ quay tham chiếu là 4000 vòng/phút)



Hình 7. Tác động của sự thay đổi ứng suất chảy A đến lực cắt (ứng suất chảy tham chiếu là 950 MPa)



Hình 8. Tác động của sự thay đổi ứng suất cứng hóa B đến lực cắt (ứng suất cứng hóa tham chiếu là 750 MPa)



Hình 9. Độ nhạy của các thông số đầu vào của mô hình lực cắt

5. KẾT LUẬN

Bài báo này phân tích độ nhạy của các yếu tố gia công như tốc độ cắt, lượng tiến dao và đặc tính vật liệu đối với lực cắt dựa trên mô hình dự đoán lực cắt. Mô hình dự đoán lực

cắt được phát triển trên nền tảng lý thuyết của Oxley kết hợp với mô hình dòng chảy Johnson-Cook, và được xác thực bằng cách so sánh với dữ liệu thực nghiệm từ các công bố khoa học trước đây. Kết quả cho thấy sự ảnh hưởng của các yếu tố gia công và vật liệu đến lực cắt. Kết quả phân tích này là nền cơ sở để nâng cao hiệu quả, độ chính xác và độ bền của quá trình gia công trong thực tiễn. ❖

Ngày nhận bài: 02/6/2025

Ngày phản biện: 10/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Choudhury, S. K., & Rath, S. (2000), "In-process tool wear estimation in milling using cutting force model". Journal of Materials Processing Technology, 99(1-3), 113-119.
- [2]. Dimla Sr, D. E., & Lister, P. M. (2000), "On-line metal cutting tool condition monitoring.: I: force and vibration analyses". International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40(5), 739-768.
- [3]. Adem, K. A., Fales, R., & El-Gizawy, A. S. (2015), "Identification of cutting force coefficients for the linear and nonlinear force models in end milling process using average forces and optimization technique methods". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 79, 1671-1687.
- [4]. Felhő, C., & Rakonczai, E. (2019), "FEM investigation of cutting force components in high-feed face milling". Cutting & Tools in Technological System, (91), 191-199.
- [5]. Sujuan, W., Tao, Z., Wenping, D., Zhanwen, S., & To, S. (2022), "Analytical modeling and prediction of cutting forces in orthogonal turning: a review". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-28.
- [6]. Merchant, M. E. (1945), "Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip". Journal of Applied Physics, 16(5), 267-275.
- [7]. Lee E. H. and Shaffer B.W. (1951), "The theory of plasticity applied to a problem of machining". Division of Applied Mathematics, 405-413.
- [8]. Oxley, P.L.B., Shaw, M.C., (1990), "Mechanics of machining: an analytical approach to assessing machinability". The Journal of Applied Mechanics, 57, 253-253.
- [9]. Hopkins, C., & Hosseini, A. (2020), "An oxley-based force model for milling of hardened steel using indexable milling tools". Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress 2020, Charlottetown, PE, Canada.