

TỐI ƯU HÓA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ TRONG QUÁ TRÌNH GIA CÔNG KHOAN VẬT LIỆU NHÔM A6061 BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS IN THE DRILLING PROCESS OF A6061 ALUMINUM USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Lê Huỳnh Đức, Lương Quốc Việt, Phạm Văn Mạnh

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

Đến Tòa soạn ngày 03/10/2025, chấp nhận đăng ngày 27/10/2025

Tóm tắt: Khoan hợp kim nhôm A6061 là nguyên công phổ biến trong chế tạo cơ khí nhưng thường gặp các vấn đề như nhiệt sinh ra lớn, bám dính phoi, sai lệch kích thước và mòn dụng cụ nhanh khi lựa chọn thông số công nghệ chưa phù hợp. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để mô phỏng quá trình khoan A6061 bằng phần mềm Abaqus. Mô hình vật liệu phôi được xây dựng theo tiêu chuẩn Johnson-Cook, dụng cụ khoan 3D được thiết lập với các điều kiện biên và thông số công nghệ thay đổi gồm tốc độ cắt, lượng chạy dao và chiều sâu khoan. Kết quả mô phỏng cho phép phân tích quá trình hình thành phoi, phân bố ứng suất - biến dạng, đồng thời xác định mối quan hệ giữa thông số công nghệ với lực cắt và chất lượng lỗ khoan. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất bộ thông số khoan tối ưu nhằm giảm lực cắt, hạn chế mòn dao và nâng cao độ chính xác gia công, góp phần tăng năng suất và chất lượng trong sản xuất cơ khí.

Từ khóa: Phương pháp phần tử hữu hạn, mô hình Johnson-Cook, lực cắt, ứng suất, biến dạng.

Abstract: Drilling A6061 aluminum alloy is a common operation in mechanical manufacturing but often encounters problems such as large heat generation, chip adhesion, dimensional deviation and rapid tool wear when selecting inappropriate technological parameters. This study uses the finite element method (FEM) to simulate the A6061 drilling process using Abaqus software. The workpiece material model is built according to Johnson-Cook standards, 3D drilling tools are set up with variable boundary conditions and technological parameters including cutting speed, feed rate and drilling depth. Simulation results allow analysis of chip formation, stress-strain distribution, and at the same time determine the relationship between technological parameters and cutting force and quality of drilled holes. On that basis, the study proposes an optimal set of drilling parameters to reduce cutting force, limit tool wear and improve machining accuracy, contributing to increased productivity and quality in mechanical manufacturing.

Keywords: Finite element method, Johnson-Cook model, shear force, stress, strain.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khoan là một trong những nguyên công cắt gọt phổ biến và quan trọng nhất trong chế tạo cơ khí, chiếm tỷ lệ lớn trong các công đoạn gia công chi tiết có lỗ. Quá trình này đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo độ chính xác

kích thước, độ đồng trục và chất lượng bề mặt, đặc biệt đối với các chi tiết làm việc trong môi trường chịu tải và nhiệt cao như linh kiện ô tô, vỏ máy bay hay các bộ phận điện tử. Tuy nhiên, quá trình khoan thường tiềm ẩn nhiều thách thức kỹ thuật do sự tương

tác phức tạp giữa dao cắt, vật liệu phôi và điều kiện gia công. Khi lựa chọn chế độ cắt chưa phù hợp, các hiện tượng bất lợi như sinh nhiệt quá mức, biến dạng dẻo cục bộ, phoi dính bám, hoặc mòn dao nhanh có thể xảy ra, ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng lỗ và tuổi thọ dụng cụ [1, 2].

Trong bối cảnh đó, việc nghiên cứu cơ chế cắt và tối ưu hóa thông số khoan trở nên cần thiết nhằm cải thiện hiệu quả gia công. Ở Việt Nam, một số công trình đã hướng tới giải quyết vấn đề này. Tiêu biểu là nghiên cứu của Chu Ngọc Hùng và cộng sự [1] về khoan lỗ sâu hợp kim nhôm có hỗ trợ rung động tần số thấp, giúp cải thiện khả năng thoát phoi và giảm nhiệt cắt; hay công trình của Bùi Ngọc Tuyên và cộng sự [2] phân tích ảnh hưởng của chế độ cắt khi khoan thép đã tôi, cung cấp dữ liệu thực nghiệm quan trọng cho việc lựa chọn thông số hợp lý.

Trên thế giới, nhiều tác giả đã khai thác phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để mô hình hóa và mô phỏng quá trình khoan, cho phép khảo sát sâu hơn về cơ chế hình thành phoi, phân bố ứng suất và nhiệt độ trong vùng cắt. Nghiên cứu của Davoudinejad và cộng sự [3] đã mô phỏng quá trình khoan hợp kim nhôm 2024-T3 bằng mô hình 3D, trong khi Lotfi và cộng sự [4] tập trung vào dự đoán nhiệt độ và mòn dao khi khoan thép. Bên cạnh đó, Shih và Chen [5] đã chỉ ra khả năng của FEM trong việc dự đoán lực cắt và ứng suất dư, còn Özel [6] và Umbrello [7] chứng minh tính hiệu quả của mô hình FEM trong mô phỏng quá trình mòn dao và ảnh hưởng hình học lưỡi cắt đến chất lượng gia công.

Từ những kết quả nghiên cứu trên, có thể thấy rằng FEM là công cụ mạnh mẽ để hiểu rõ cơ chế vật lý trong khoan và hỗ trợ tối ưu hóa thông số công nghệ. Do đó, nghiên cứu này tập trung xây dựng mô hình mô phỏng 3D quá

trình khoan hợp kim nhôm A6061 bằng phần mềm Abaqus, sử dụng mô hình vật liệu Johnson-Cook nhằm mô tả ứng xử của phoi dưới tác động nhiệt - cơ phức tạp. Mục tiêu của nghiên cứu là phân tích ảnh hưởng của các thông số như tốc độ cắt, lượng chạy dao và chiều sâu khoan đến ứng suất, biến dạng và sự hình thành phoi, qua đó đề xuất chế độ khoan hợp lý giúp giảm mòn dụng cụ, cải thiện độ chính xác lỗ và nâng cao hiệu quả gia công.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

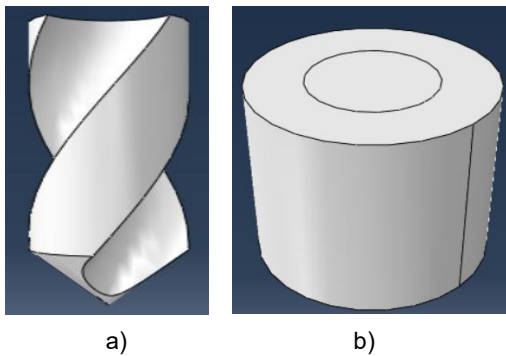
2.1. Mô hình phần tử hữu hạn

Trong nghiên cứu này, quá trình khoan hợp kim nhôm A6061 được mô phỏng bằng phần mềm Abaqus/Explicit, cho phép mô tả chính xác các hiện tượng phi tuyến phức tạp xảy ra trong vùng cắt gọt như tiếp xúc dao - phoi liên tục biến đổi, biến dạng dẻo cục bộ lớn, sự hình thành và tách phoi, cũng như sự phân bố ứng suất - nhiệt động trong quá trình cắt. Phương pháp explicit được lựa chọn vì có khả năng xử lý hiệu quả các bài toán biến dạng lớn và va chạm nhanh, vốn đặc trưng trong quá trình khoan kim loại.

Mô hình mũi khoan được xây dựng với đường kính danh nghĩa 12 mm, góc đỉnh 118°, góc xoắn 30°, vật liệu cacbua vonfram (WC-Co), mô phỏng đúng với hình học dụng cụ cắt phổ biến trong thực tế. Phôi vật liệu nhôm hợp kim A6061 được mô tả ở dạng hình trụ kích thước 30×50 mm, có các đặc trưng cơ học được định nghĩa theo mô hình vật liệu Johnson-Cook để phản ánh đúng ứng xử của vật liệu dưới tác động của ứng suất và nhiệt độ cao.

Để giảm thời gian tính toán và tăng độ ổn định của bài toán, hình học dao và phoi được đơn giản hóa đối xứng theo trục khoan, đồng

thời lưới phần tử được chia mịn tại vùng tiếp xúc giữa mũi khoan và phôi - nơi xảy ra biến dạng dẻo lớn và phát sinh nhiệt cao (Hình 1a, 1b). Phần còn lại của phôi được chia lưới thưa hơn nhằm tối ưu hóa tốc độ xử lý. Các điều kiện biên, ma sát và tốc độ cắt được thiết lập dựa trên giá trị thực nghiệm trong phạm vi nghiên cứu, đảm bảo mô hình phản ánh đúng thực tế quá trình khoan.



Hình 1. Mô hình hoá. a) Dụng cụ cắt; b) Phôi

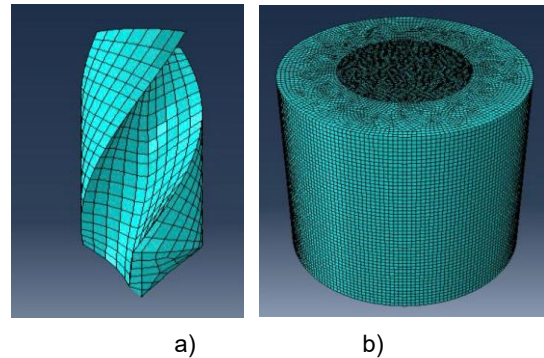
2.2. Chia lưới

Hình 2 minh họa quá trình chia lưới cho dao và phôi trong mô hình phần tử hữu hạn. Việc chia lưới đóng vai trò quan trọng trong độ chính xác và hiệu quả của bài toán mô phỏng, đặc biệt đối với các hiện tượng phi tuyến như tiếp xúc dao - phôi và biến dạng dẻo cục bộ trong vùng cắt. Nguyên tắc được áp dụng là tăng mật độ lưới tại vùng chịu tác động cơ học mạnh, nơi có sự hình thành phoi và tập trung ứng suất cao, trong khi các vùng xa mặt cắt được chia lưới thưa hơn nhằm giảm số lượng phần tử, tiết kiệm thời gian tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết.

Dao khoan được giả thiết là vật rắn tuyệt đối (rigid body), sử dụng phần tử dạng Hex (C3D8R) với kích thước trung bình của phần tử là 1,4 mm, giúp đảm bảo tính ổn định trong quá trình cắt. Đối với phôi hợp kim nhôm A6061, do hình học cong và vùng khoan có dạng xoắn phức tạp, mô hình sử dụng phần tử dạng Tet (C3D10) với mật độ lưới cao hơn tại

vùng tiếp xúc, khoảng 150 phần tử được chia trong vùng cắt với kích thước phần tử trung bình 0,5 mm.

Cấu trúc lưới được thiết lập như vậy cho phép mô hình mô phỏng chính xác sự phát triển của ứng suất, biến dạng và quá trình hình thành phoi trong khi vẫn duy trì thời gian tính toán hợp lý.



Hình 2. Tạo lưới của dụng cụ (a) và phôi (b)

2.3. Các thông số gia công và điều kiện biên

Việc lựa chọn thông số cắt có ý nghĩa quan trọng trong mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn, bởi đây là các yếu tố trực tiếp chi phối quá trình hình thành phoi, mức độ biến dạng dẻo, lực cắt và sự phân bố ứng suất - nhiệt trong vùng cắt. Các thông số gia công trong nghiên cứu này được lựa chọn dựa trên khuyến nghị từ các tiêu chuẩn cắt gọt và bảng tra chế độ cắt dành cho vật liệu nhôm A6061 do Mitsubishi Materials và Sandvik Coromant cung cấp [8, 9]. Theo hai nguồn tài liệu này, vận tốc cắt phù hợp khi khoan nhôm bằng mũi khoan WC-Co đường kính 12 mm thường nằm trong khoảng 60-180 m/ph, đảm bảo khả năng thoát phoi tốt, giảm ma sát và hạn chế bám dính phoi lên dụng cụ [8, 9].

Ngoài ra, khoảng giá trị thông số cắt được chọn cũng dựa trên dải vận tốc cắt đang được sử dụng phổ biến trong thực tế gia công, đặc biệt trong khoan nhôm A6061 cho các ứng dụng cơ khí chính xác và công nghiệp khuôn mẫu. Các nghiên cứu thực nghiệm gần đây

cho thấy vận tốc cắt từ 70-150 m/ph cho kết quả ổn định về lực cắt và độ nhẵn bề mặt, đồng thời giúp giảm hiện tượng leo dao khi khoan nhôm hợp kim [8].

Bên cạnh yếu tố thực nghiệm và tiêu chuẩn, các thông số gia công còn được xét đến dưới góc độ ổn định mô phỏng trong Abaqus/Explicit. Việc lựa chọn vận tốc cắt quá cao có thể khiến bước thời gian trong explicit trở nên rất nhỏ, dẫn tới tăng lớn thời gian tính toán hoặc gây mất ổn định lưới phần tử. Do đó, dải vận tốc cắt 70-180 m/ph được lựa chọn nhằm đảm bảo mô phỏng hội tụ tốt, mô tả đúng hiện tượng vật lý và vẫn nằm trong phạm vi ứng dụng thực tế [9].

Trong nghiên cứu này, lượng chạy dao được cố định ở mức 0,35 mm/vòng, phù hợp với khuyến nghị khi khoan nhôm bằng mũi khoan cacbua đường kính 12 mm để giảm sinh nhiệt và ma sát tại mép cắt [8]. Chiều sâu lỗ khoan được thiết lập 50 mm, tương ứng với kích thước gia công tiêu chuẩn trong thực tế. Thời gian gia công trong mô phỏng được đặt là 0,1 giây để đảm bảo mô hình bắt được quá trình ổn định của vùng cắt trong giai đoạn khoan.

Thông số vận tốc cắt dùng trong mô phỏng được thể hiện trong Bảng 1, bao gồm sáu mức vận tốc nhằm khảo sát toàn diện ảnh hưởng của tốc độ đến ứng suất, biến dạng, lực cắt và khả năng hình thành phoi. Bộ thông số này giúp đánh giá chính xác cơ chế cắt gọt trong khoan A6061, đồng thời đảm bảo sự ổn định của mô phỏng theo yêu cầu của Abaqus/Explicit.

Bảng 1. Thông số gia công cho các lần mô phỏng

Số lần mô phỏng	Vận tốc cắt (m/ph)
1	70
2	80
3	100
4	120
5	150
6	180

Để mô tả đường cong ứng suất biến dạng dưới các hàm toán liên tục, mô hình Johnson - Cook được lựa chọn dựa trên mối liên hệ giữa ứng suất tương đương với biến dạng tương đương, tốc độ biến dạng và nhiệt độ [3]. Đường cong mô tả ứng suất tương đương với các tham biến được biểu diễn trong phương trình dưới đây:

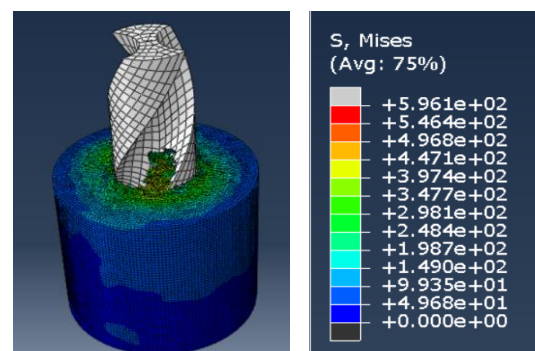
$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right] \quad [3]$$

Trong đó A là ứng suất chảy ban đầu; B là hệ số cứng hóa; n là số mũ của độ cứng khi gia công; C là hệ số phụ thuộc vào tốc độ biến dạng và m là hệ số mềm vì nhiệt.

Trong quá trình mô phỏng gia công phôi 6 sẽ được kẹp chặt đẳng đồ gá nên ta sẽ cần hạn chế 6 bậc tự do, dao sẽ thực hiện quá trình khoan với chuyển động chính là quay và tịnh tiến lên ta ràng buộc dao là 4 bậc tự do.

2.4. Phương pháp mô phỏng phân tích

Sau khi mô phỏng tại tốc độ cắt 80 m/phút, lượng chạy dao 0,35 mm/vòng và chiều sâu khoan 50 mm, kết quả được lưu và hiển thị trong môi trường Visualization của Abaqus (Hình 3). Dữ liệu thu được sẽ được phân tích để đánh giá cơ tính quá trình khoan - bao gồm sự hình thành phoi, phân bố ứng suất và ảnh hưởng của thông số công nghệ đến cơ chế cắt gọt.



Hình 3. Kết quả ứng suất khi s = 0,35 mm/v, v = 80 m/ph, t = 50 mm

2.5. Phương pháp tính toán phân tích

Để đối chiếu với kết quả mô phỏng, nghiên cứu trình bày phương pháp tính toán phân tích ứng suất cắt và so sánh các giá trị phân tích với kết quả FEM. Để rút ngắn thời gian tính toán, chỉ khảo sát một trường hợp với một bộ thông số công nghệ (xem Bảng 2) và tiến hành so sánh trực tiếp giữa hai phương pháp.

Bảng 2. Thông số công nghệ của quá trình gia công

Lượng chạy dao (mm/vòng)	Đường kính (mm)	Vận tốc cắt (m/ph)
f=0,35	D=12	V _c =80

Tính toán số vòng quay:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D}$$

Công suất cắt:

$$P_c = \frac{f_n \cdot v_c \cdot D_c \cdot k_c}{240 \cdot 10^3}$$

Moment xoắn:

$$M_c = \frac{P_c \cdot 30 \cdot 10^3}{\pi \cdot n}$$

Lực cắt:

$$F_f = 0.5 \cdot k_c \cdot \frac{D}{2} \cdot f_n \cdot \sin k_r$$

Ứng suất pháp dọc trục:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi \cdot d^2} \quad (v_{oid} = 0,35 \cdot D)$$

Ứng suất cắt do xoắn:

$$\tau_{max} = \frac{16M}{\pi d^3}$$

Ứng suất Von-Mises:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

Sau khi thay các thông số và tính toán ta được kết quả ứng suất: $\sigma_{vm} \approx 566,4$ Mpa.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

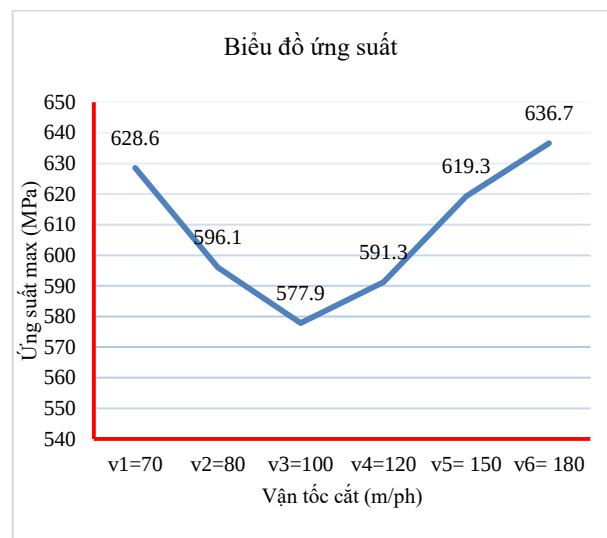
3.1. So sánh quá trình mô phỏng phân tích và tính toán phân tích

Trong nghiên cứu này, ứng suất khi khoan hợp

kim nhôm A6061 được xác định bằng hai phương pháp: tính toán lý thuyết và mô phỏng số bằng phần tử hữu hạn (Abaqus). Kết quả so sánh cho thấy có sai khác khoảng 4,4%. Nguyên nhân chính là do mô phỏng giả thiết vật liệu đồng nhất, đẳng hướng, hệ số ma sát và điều kiện biên cố định, trong khi thực tế các yếu tố như nhiệt độ, rung động và thông số phá hủy trong mô hình Johnson-Cook lại biến thiên. Tuy vậy, mức sai khác nhỏ cho thấy mô hình lý thuyết và mô phỏng có độ phù hợp cao, hoàn toàn có thể dùng cho thiết kế sơ bộ và đối chiếu kết quả thực nghiệm.

3.2. Phân tích ứng suất khi thay đổi vận tốc cắt

Để đánh giá ảnh hưởng của vận tốc cắt đến trạng thái ứng suất trong quá trình khoan, tiến hành khảo sát sáu giá trị vận tốc từ 70-180 m/ph. Kết quả mô phỏng (Hình 4) cho thấy ứng suất Von-Mises cực đại biến thiên phi tuyến theo vận tốc cắt.



Hình 4. Biểu đồ ứng suất khi thay đổi vận tốc cắt

Ở vận tốc 70-80 m/ph, mũi khoan khó tạo phoi liên tục, dẫn đến hiện tượng trượt và cày, chèn dè vật liệu. Không xảy ra quá trình hình thành phoi làm ma sát tăng, vật liệu chịu biến dạng dẻo lớn, làm chất lượng bề mặt suy giảm.

Khi tăng vận tốc đến khoảng 100-120 m/ph, quá trình cắt diễn ra hiệu quả hơn, bắt đầu xảy ra quá trình hình thành phoi làm cho ma sát và lực cắt giảm, ứng suất cực đại đạt giá trị thấp nhất vào khoảng 577,9 MPa. Chất lượng bề mặt ở giai đoạn này tốt nhất.

Tuy nhiên, tại vận tốc cao 150-180 m/ph, lượng nhiệt sinh ra lớn gây mềm hóa vùng tiếp xúc và làm giảm độ bền dao. Quá trình mòn dao, tăng ma sát và hiện tượng dính bám phoi xảy ra, khiến ứng suất trong phoi tăng trở lại, đạt cực đại 636,7 MPa ở 180 m/ph.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tiến hành mô phỏng quá trình khoan hợp kim nhôm A6061 bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trên phần mềm Abaqus, đồng thời đối chiếu với kết quả tính toán lý thuyết để kiểm chứng độ chính xác của mô hình. Sai khác giữa hai phương pháp chỉ khoảng 4,4%, chứng tỏ mô hình mô phỏng có độ tin cậy cao và hoàn toàn có thể ứng dụng trong phân tích, dự đoán cơ chế cắt gọt.

Kết quả mô phỏng cho thấy ứng suất Von-Mises cực đại biến thiên phi tuyến theo vận tốc cắt. Ở vùng vận tốc thấp (70-80 m/ph), ứng suất lớn do ma sát và biến dạng dẻo cao khi phoi chưa hình thành hoàn chỉnh. Khi tăng vận tốc đến khoảng 100-120 m/ph, quá trình tạo phoi diễn ra ổn định, ứng suất cực đại đạt giá trị nhỏ nhất (577,9 MPa), cho chất lượng bề mặt tốt. Tuy nhiên, khi vận tốc vượt quá 150 m/ph, nhiệt sinh ra nhiều làm giảm độ cứng vật liệu, tăng mòn dao và dính bám phoi, khiến ứng suất tăng trở lại (636,7 MPa).

Kết quả này cho thấy vận tốc cắt trung bình là vùng tối ưu để đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả cắt gọt, độ bền dụng cụ và chất lượng bề mặt. Đồng thời, nghiên cứu khẳng định tính phù hợp của mô hình Johnson-Cook trong mô phỏng quá trình khoan, mở ra hướng ứng dụng FEM trong việc tối ưu hóa chế độ cắt và thiết kế quy trình gia công chính xác cho các vật liệu hợp kim nhôm trong sản xuất thực tiễn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Chu Ngọc Hùng, Nguyễn Văn Dự, "Nghiên cứu giải pháp khoan lỗ sâu trên hợp kim nhôm có sự trợ giúp của rung động tần số thấp", Tạp chí Khoa học & Công nghệ, Đại học Thái Nguyên, tr. 15–21, (2015).
- [2] Bùi Ngọc Tuyên, Phan Thanh Hà, "Nghiên cứu chế độ cắt khi khoan thép đã tôi", Tạp chí Cơ khí Việt Nam, tr. 22–28, (2021).
- [3] Davoudinejad, A., Tosello, G., "Finite element modeling of drilling process of aluminum 2024-T3 alloy", Procedia CIRP, Vol. 58, pp. 307–312, (2017).
- [4] Lotfi, M., Amini, S., Al-Awady, A., "Three-dimensional finite element modeling of drilling process in steel: Prediction of temperature, tool wear, and built-up edge", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 97, Issue 9, pp. 3915–3928, (2018).
- [5] Shih, A.J., Chen, C.C., "Finite element analysis of the drilling process," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 14, pp. 1686–1698, (2006).
- [6] Özel, T., Zeren, E., "Finite element method simulation of machining of AISI 1045 steel with a round edge cutting tool", CIRP Annals, Vol. 56, No. 1, pp. 65–68, (2007).
- [7] Umbrello, D., Micari, F., "A finite element model for the prediction of tool wear in machining", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 5, pp. 671–679, (2006).

- [8] Mitsubishi Materials Corporation, “Recommended Cutting Conditions for Carbide Drills — Aluminium Alloys (Including A6061)”, Catalogue Drilling Data Sheet, pp. 1–15, (2020).
- [9] Sandvik Coromant, “Cutting Data Guide - Drilling Aluminium Alloys Using Solid Carbide Tools”, Sandvik Coromant Technical Guide, pp. 45–51, (2019)

Thông tin liên hệ: **Lê Huỳnh Đức**

Điện thoại: 0393003915 - Email: lhduc@uneti.edu.vn

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