

NGHIÊN CỨU ĐẶC ĐIỂM CỦA LỰC CẮT TRONG GIA CÔNG PHAY RÃNH MICRO BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

RESEARCH CHARACTERISTICS OF CUTTING FORCE IN MICRO TRENCH MILLING BY FINITE ELEMENT METHOD

ThS. Nguyễn Tuấn Hưng

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Email: nthung@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Trong gia công vi mô, lực cắt quyết định chất lượng bề mặt, độ chính xác và tuổi thọ dụng cụ. Hiện tượng gãy dụng cụ thường xảy ra khi lực cắt biến đổi bất thường, làm gián đoạn quá trình. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để phân tích lực cắt trong quá trình gia công rãnh vi mô, với các thông số gồm tốc độ cắt, lượng ăn dao và chiều sâu cắt. Kết quả cho thấy lực cắt phụ thuộc mạnh vào thông số công nghệ, từ đó hỗ trợ lựa chọn chế độ cắt hợp lý, tối ưu hóa quá trình và nâng cao chất lượng gia công.

Từ khóa: Gia công vi mô; Phương pháp phần tử hữu hạn; Thông số công nghệ; Lực cắt.

ABSTRACT

In micro-machining, cutting force determines the surface quality, accuracy and tool life. Tool breakage often occurs when the cutting force changes abnormally, interrupting the process. This study uses the finite element method (FEM) to analyze the cutting force during micro-groove machining, with parameters including cutting speed, feed rate and depth of cut. The results show that the cutting force strongly depends on the process parameters, thereby supporting the selection of reasonable cutting mode, optimizing the process and improving the machining quality.

Keywords: Micro milling; Finite element method; Technological parameters; Cutting force. 

1. GIỚI THIỆU

Nguyên lý gia công vi mô cơ bản tương tự như gia công vĩ mô, nhưng không đơn thuần chỉ là việc thu nhỏ kích thước của công cụ và phôi. Khi thu nhỏ, vấn đề cứng vững của dụng cụ trở nên khó đảm bảo, đòi hỏi thiết kế và chế tạo dụng cụ có độ bền và độ cứng cao, phù hợp với tốc độ cắt lớn [1]. Ngoài ra, các thông số công nghệ ảnh hưởng mạnh đến lực cắt, từ đó quyết định chất lượng bề mặt, độ chính xác và tuổi thọ dụng cụ [2].

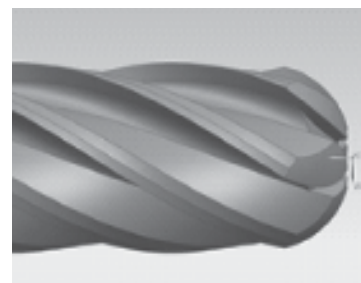
Trong gia công vi mô, một số thách thức lớn như nhiệt sinh ra trong vùng cắt, quá trình mòn dụng cụ, biến cứng bề mặt phôi và rung động có thể ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả và độ tin cậy gia công [3]. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để phân tích ảnh hưởng của lớp phủ dụng cụ và cơ chế hồng học khi phay vật liệu khó gia công như Inconel 718 [3], cũng như vai trò của thông số cắt đối với ứng suất dư trong quá trình phay [2, 5]. Bên cạnh đó, các nghiên cứu gần đây còn tập trung mô phỏng lực cắt bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), kết hợp mô hình vật liệu như Johnson-Cook, nhằm làm rõ mối quan hệ giữa thông số cắt và sự hình thành ứng suất dư trong phay vi mô [4, 5].

Xuất phát từ yêu cầu ứng dụng trong các chi tiết vi mô như mao dẫn thủy lực, nghiên cứu này xây dựng mô hình FEM để mô phỏng lực cắt trong quá trình phay rãnh vi mô. Các thông số cắt được thay đổi và so sánh với kết quả từ các nghiên cứu trước, từ đó rút ra kết luận về ảnh hưởng của thông số công nghệ đến lực cắt và khả năng tối ưu hóa quá trình gia công [1-5].

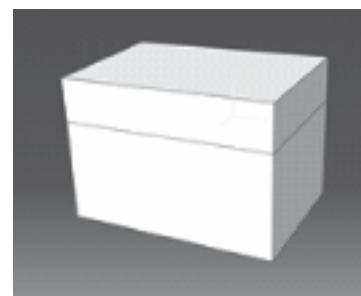
2. MÔ HÌNH HÓA QUÁ TRÌNH PHAY MICRO

2.1. Mô hình hình học của dụng cụ và phôi

Đầu tiên, mô hình hình học của công cụ và phôi được thiết lập bằng cách sử dụng phần mềm NX. Sau đó, các mô hình được nhập vào phần mềm Abaqus. Đường kính của dao cắt là $500\mu\text{m}$, bán kính cạnh của dao cắt là $2\mu\text{m}$, vật liệu của dụng cụ là cacbua vonfram. Kích thước của phôi là $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 3\text{mm}$. Để cải thiện hiệu quả mô phỏng, giảm thời gian chạy mô phỏng và đảm bảo tính chính xác của kết quả mô phỏng, các mô hình công cụ và phôi được đơn giản hóa trong mô hình. Mô hình công cụ được hiển thị trong Hình 1a và mô hình phôi được hiển thị trong Hình 1b.



(a)



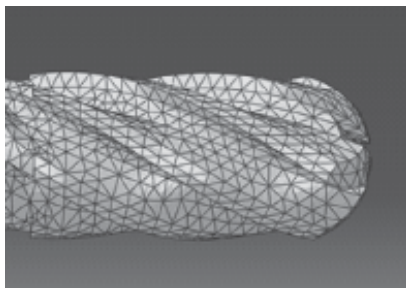
(b)

Hình 1. Mô hình hóa công cụ và phôi bằng phần mềm NX: (a) Công cụ; (b) Phôi.

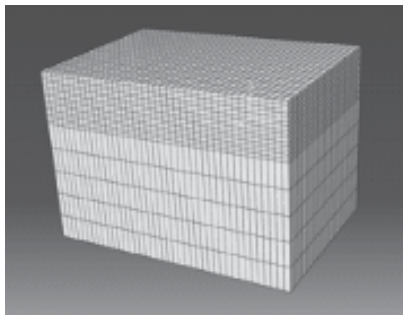
2.2. Chia lưới

Việc chia lưới hợp lý có thể đảm bảo chất lượng của mô phỏng và cũng có thể giảm thời gian chạy mô phỏng. Phôi có hình dạng khối lập phương, chia phôi thành những phần

tử lưới hình dạng nút tứ giác. Công cụ có hình dạng phức tạp, ta nên chia lưới công cụ theo dạng phần tử nút tam giác. Cách chia này sẽ làm quá trình mô phỏng lâu hơn do các phần tử dạng tam giác và tứ giác không cùng dạng ma trận. Nhưng nó sẽ hạn chế được sai số do việc chia lưới, từ đó hạn chế sai số kết quả mô phỏng. Để rút ngắn quá trình mô phỏng, ta chỉ lấy phần đầu công cụ để tiến hành quá trình cắt gọt. Lưới của dao được thể hiện trong hình 2a, lưới của phôi được thể hiện trong hình 2b.



(a)



(b)

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

2.3. Các thông số gia công

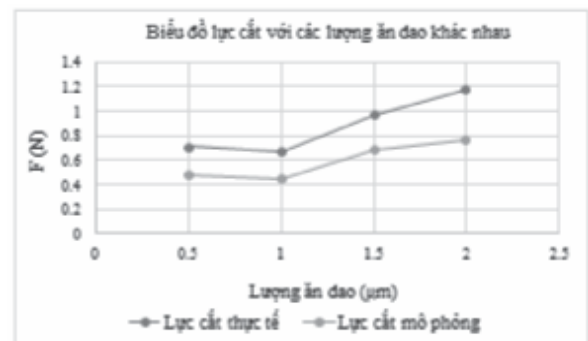
Tốc độ trục chính thay đổi qua các lần mô phỏng giống nhau. Chiều sâu cắt ae không đổi. Nghiên cứu phân tích sự hình thành phoi và lực phay bằng cách chọn các lượng ăn dao khác nhau fz. Việc lựa chọn tham số phay được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số phay micro

Số lần mô phỏng	Tốc độ trục chính (v/ph)	Lượng ăn dao ($\mu\text{m}/\text{răng}$)	Chiều sâu cắt (μm)
1	30,000 (v/ph)	0.5 $\mu\text{m}/\text{răng}$	50 μm
2	30,000 (v/ph)	1 $\mu\text{m}/\text{răng}$	50 μm
3	30,000 (v/ph)	1.5 $\mu\text{m}/\text{răng}$	50 μm
4	30,000 (v/ph)	2 $\mu\text{m}/\text{răng}$	50 μm

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Từ số liệu mô phỏng ứng suất và biến dạng của phần mềm, ta đưa ra được đồ thị về mối quan hệ giữa giá trị lực cắt và lượng ăn dao trong quá trình gia công rãnh vi mô và so sánh lực cắt mô phỏng với lực cắt thực tế từ kết quả của các bài báo quốc tế. Như chúng ta thấy trong biểu đồ, lực cắt mô phỏng khoảng 0.48N khi cắt ở lượng ăn dao là 0.5 $\mu\text{m}/\text{răng}$. Lực cắt có chiều hướng giảm đi khi cắt với lượng ăn dao là 1 $\mu\text{m}/\text{răng}$. Điều này cho ta thấy, ở lượng ăn dao 0.5 $\mu\text{m}/\text{răng}$ không có phoi được tạo ra, hoàn toàn xảy ra hiện tượng chèn, cày, chính vì vậy lực cắt cao hơn. Khi lượng ăn dao tăng lên 1 $\mu\text{m}/\text{răng}$, bắt đầu có quá trình thoát phoi xảy ra nên lực cắt có phần giảm đi một chút, khoảng 0.45N.



Hình 3. Giá trị lực cắt với lượng ăn dao.

Với lượng ăn dao là $1.5\mu\text{m}/\text{răng}$, quá trình thoát phoi xảy ra, lực cắt tiếp tục tăng lên mức 0.68 N . Điều này chứng tỏ đã xảy ra quá trình thoát phoi, nhưng vẫn còn hiện tượng chèn, cày, thoát phoi chưa hoàn toàn, vì vậy lực cắt vẫn tăng cao.

Với lượng ăn dao là $2\mu\text{m}/\text{răng}$, quá trình hình thành phoi xảy ra rõ rệt hơn, lực cắt có phần tăng chậm từ 0.68 N lên 0.75 N . Điều này cho thấy khi tăng lượng ăn dao trong quá trình gia công, đồng nghĩa với việc tăng lực cắt.

Khi xảy ra hiện tượng mòn dao, lực cắt sẽ theo đó mà tăng đều theo hàm tuyến tính, từ đó đưa ra được đường lối công nghệ cụ thể cho người vận hành máy và kiểm tra dao cụ với từng loại phôi liệu cụ thể.

Quá trình mô phỏng lực cắt trong gia công vi mô bằng phương pháp phần tử hữu hạn có phần thấp hơn so với lực cắt thực tế trong các số liệu ở các bài báo quốc tế. Nguyên nhân được cho là trong quá trình mô phỏng, nhiệt độ trong quá trình gia công được để cố định, hệ số ma sát trong quá trình gia công cũng để cố định. Phôi và dao được mô hình hóa ở dạng lý tưởng, tức là vật liệu là đồng nhất và đẳng hướng, ngoài ra, để quá trình mô phỏng được diễn ra nhanh chóng, thí nghiệm này đã hóa cứng công cụ, coi như công cụ là vật liệu cứng tuyệt đối và không có quá trình mòn cạnh công cụ trong gia công. Các nguyên nhân này đã làm cho lực cắt mô phỏng có phần thấp hơn so với lực cắt gia công thực tế. Tuy nhiên, nó vẫn tăng và giảm theo đúng hàm tuyến tính với lực cắt thực tế. Từ đó có thể thấy kết quả mô phỏng có thể chấp nhận được và có tính đúng đắn trong việc phân tích lực cắt và quá trình hình thành phoi sau gia công.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bài báo này nhằm nhấn mạnh lợi thế của việc sử dụng phần mềm mô phỏng lực cắt trong quá trình gia công vi mô ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn, từ đó giảm thời gian thí nghiệm, tiết kiệm được kinh phí thí nghiệm và kết quả có thể sử dụng được để phân tích các thông số gia công, nhằm đưa ra các thông số công nghệ phù hợp cho quá trình gia công. Từ quá trình hình thành phoi đến việc thay đổi lượng ăn dao dẫn tới sự thay đổi lực cắt. Việc nghiên cứu đặc điểm của lực cắt đóng vai trò quan trọng trong việc gia công vi mô nhằm hạn chế việc gây công cụ đột ngột, giảm thời gian thí nghiệm và kinh phí thí nghiệm, đưa ra được bộ thông số công nghệ phù hợp đảm bảo chất lượng bề mặt gia công ngay trong quá trình gia công. Các kết luận sau có thể được rút ra sau khi nghiên cứu có kết quả:

1) Bài báo cung cấp một phương pháp gia công mới, ứng dụng những ưu điểm từ phương pháp gia công truyền thống, sử dụng lợi thế hình dáng hình học của công cụ và phương pháp lập trình gia công CNC có thể gia công hầu hết các dạng bề mặt.

2) Các hệ số ma sát, hệ số nhiệt không đổi được sử dụng trong FE phần nào làm kết quả mô phỏng không sát với thí nghiệm thực tế.

3) Việc mô phỏng giúp theo dõi lực cắt trong quá trình gia công, tránh được sự cố công cụ gãy đột ngột, tăng hiệu suất gia công, chất lượng bề mặt ổn định.

4) Kích thước của rãnh vi mô cho thấy rằng quá trình phay vi mô có khả năng tạo ra các biên dạng vi mô một cách chính xác.

5) Các vấn đề như chất lượng bề mặt,

nhiệt độ trong gia công,... cần được nghiên cứu một cách kết hợp để cho ra mô hình mô phỏng FE sát với thực tế, vẫn đang là một đề tài mở để nghiên cứu sâu hơn.❖

Ngày nhận bài: **05/9/2025**

Ngày phản biện: **15/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. I. Uzun, K. Aslantas, F. Bedir, “*An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy*”. *Wear*, 300(1-2), 8-19, 2013.
- [2]. H. Chengming, Y. Shaohua, L. Gang, “*Influence of cutting parameters on residual stresses in face milling*”. *Applied Mechanics and Materials*, 44-47, 3017-3021, 2011.
- [3]. W. Zheng, “*Cutting Performance and Failure Mechanisms of Coated Tools when Milling Inconel 718*”. Thesis, Shandong University, 2012.
- [4]. X. Chen, S. Liu, Y. Chen, “*Influence of micro-milling machining parameters on residual stresses in alumina bioceramics – a three-dimensional finite element simulation study*”. *Ceramics International*, 50(2), 2637-2648, 2024.
- [5]. C. Zhang, J. Sun, J. Guo, “*Simulation analysis and experimental study of milling surface residual stress of Ti-10V-2Fe-3Al*”. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(4), 798-806, 2018.