

KHẢO SÁT SAI LỆCH GÓC XOẮN KHI CHUỐT RÃNH XOẮN CHI TIẾT DẠNG LỖ SÂU

ANALYSIS OF ANGULAR TWIST ERROR IN HELICAL GROOVE BROACHING OF DEEP-HOLE WORKPIECES

ThS. Phạm Ngọc Bình

Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng

Email: binh.phamngoc@gmail.com

TÓM TẮT

Trong gia công chuốt rãnh xoắn của các chi tiết dạng lỗ sâu, biến dạng xoắn đàn hồi của cán dao chuốt là nguyên nhân chính gây sai lệch hình học và bước xoắn của rãnh. Bài báo này trình bày quá trình mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) nhằm đánh giá ứng suất và biến dạng xoắn của cán dao chuốt trong trường hợp chuốt rãnh thực tế. Kết quả cho thấy, biến dạng xoắn đàn hồi tích lũy trên chiều dài lớn có thể gây ra sai số về bước xoắn và góc xoắn của rãnh. Nghiên cứu này làm cơ sở cho việc tính toán lựa chọn chế độ công nghệ, lựa chọn vật liệu và kích thước cán dao tối ưu về mặt kỹ thuật và kinh tế.

Từ khóa: Chuốt rãnh xoắn; Biến dạng xoắn; Cán dao chuốt; Lỗ sâu.

ABSTRACT

In the helical broaching of deep-hole workpieces, elastic torsional deformation of the broaching tool holder is the primary cause of geometric deviations and helix pitch errors in the groove. This paper presents a numerical simulation using the finite element method (FEM) to evaluate the torsional stress and deformation of the broaching tool holder under actual broaching conditions. The results show that accumulated elastic torsional deformation over a substantial length can induce errors in the helix pitch and helix angle of the groove. This study serves as a basis for determining appropriate machining parameters, selecting suitable materials, and optimizing the tool holder dimensions for both technical and economic efficiency.

Keywords: Helical groove broaching; Torsional deformation; Broach arbor; Deep-hole machining.



1. TỔNG QUAN

Rãnh xoắn trong lỗ sâu là một trong những đặc trưng hình học quan trọng của nhiều chi tiết trong công nghiệp cơ khí chính xác, đặc biệt là trong lĩnh vực sản xuất quốc phòng. Các phương pháp gia công phổ biến gồm rèn có lõi, chuốt rãnh và gia công bằng điện hóa. Trong số đó, chuốt rãnh xoắn được đánh giá là phương pháp có năng suất cao, lực cắt ổn định và chất lượng bề mặt tốt [3].

Độ chính xác hình học và độ ổn định của bước xoắn trên toàn chiều dài là yêu cầu cốt lõi trong gia công lỗ sâu. Ozturk và cộng sự [1] đã phân tích biến dạng của trục dụng cụ trong gia công lỗ sâu và đề xuất mô hình dự báo sai lệch, trong đó độ cứng xoắn của trục là thông số quyết định. V.Mautner và cộng sự [2] đã tiến hành mô phỏng FEM so sánh biến dạng và độ võng của cán dao tiện có tiết diện chữ nhật và đa giác, sử dụng phần mềm ANSYS, kết quả cho thấy cán dao kiểu CAPTO có độ võng nhỏ hơn đáng kể. Kountanya và cộng sự [4] đã nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng dụng cụ đến lực cắt và chất lượng bề mặt trong gia công cắt gọt, chỉ ra rằng biến dạng đàn hồi của dụng cụ là nguồn sai số hình học không thể bỏ qua.

Tuy nhiên, ảnh hưởng của biến dạng xoắn đàn hồi của cán dao chuốt đến sai lệch bước xoắn trong gia công lỗ sâu có tỷ lệ L/D lớn vẫn cần được nghiên cứu và đánh giá định lượng. Do đó, nghiên cứu này tập trung phân tích định lượng hiện tượng trên thông qua việc nghiên cứu và mô phỏng một trường hợp thực tế của quá trình chuốt một chi tiết lỗ sâu với thông số và công nghệ cụ thể để thấy rõ ảnh hưởng của hiện tượng xoắn cán dao đến sai lệch hình học của rãnh và sai lệch bước xoắn.

2. KHẢO SÁT XOẮN CỦA CÁN DAO CHUỐT

2.1. Thông số công nghệ chuốt

Hình 1 mô tả sơ đồ phân tích lực cắt và thông số công nghệ của quá trình chuốt rãnh:

- Đường kính lỗ: $D = 105 \text{ mm}$;
- Chiều dài lỗ có rãnh: $L = 2.400 \text{ mm}$;
- Bước xoắn: $1:20 \rightarrow p = 2.100 \text{ mm/vòng}$;
- Vật liệu phôi: 30CrNiMo8, đã qua tôi và ram;
- Vật liệu cán dao: 40CrMo4;
- Đường kính cán dao: $\Phi 56/\Phi 43 \text{ mm}$.

2.2. Xác định Mô men tác động lên cán dao

Lực cắt tổng trên dao P_z được xác định theo công thức:

$$P_z = k_c \cdot f = k_c \cdot a_c \cdot b_c \cdot n$$

Trong đó:

$k_c = 6.400 \text{ N/mm}^2$ - Lực cắt đơn vị của thép 30CrNiMo8 đã qua nhiệt luyện [3]; $a_c = 0,04 \text{ mm}$ - Chiều dày lớp cắt; $b_c = 5,35 \text{ mm}$ - Chiều rộng hiệu dụng; $n = 18$ - Tổng số lưỡi cắt đồng thời.

$$P_z = 0,04 \cdot 5,35 \cdot 18 \cdot 6400 = 24.652 \text{ N}$$

Các lực thành phần theo phương pháp tuyến và tiếp tuyến:

$$Q = P_z \cdot \cos \alpha \text{ và } K = P_z \cdot \sin \alpha$$

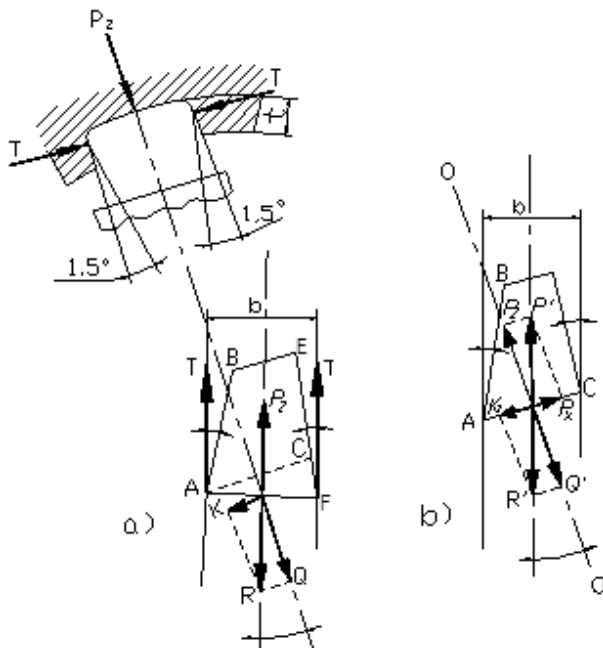
Trong đó, α là góc nâng của rãnh xoắn:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\pi \cdot D}{p} \right)$$

$$\alpha = \arctan(0,15708) = 8^\circ 55' 6''$$

$$Q = 24.652 \cdot \cos(8^\circ 55' 6'') = 24.354 \text{ N}$$

$$t_k = 24.652 \cdot \sin(8^\circ 55' 6'') = 3.821 \text{ N}$$



Hình 1. Phân tích lực cắt trên dao chuốt

Giả thiết rằng đĩa dao gắn cố định lên thân dao và toàn bộ lực cắt tiếp tuyến phân bố đều trên từng lưỡi dao thì mô men xoắn do phân lực cắt tiếp tuyến K tác động lên cán dao được tính như sau:

$$T = h \times K \times r = 1,35 \times 3.821 \times 0,0525 \text{ N.m}$$

$$T = 270 \text{ N.m}$$

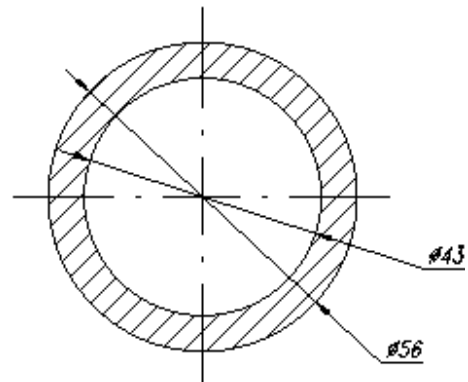
Trong đó: $h = 1,3-1,4$ - Hệ số kể đến ma sát dẫn hướng, sai số chế tạo dao và rung động (lấy $h = 1,35$); $r = D/2 = 52,5 \text{ mm}$ - Bán kính dao đĩa.

2.3. Mô hình hình học và điều kiện biên

Cán dao được mô hình hóa là ống trụ rỗng tiết diện tròn, vật liệu 40CrMo4 với $E = 210.000 \text{ MPa}$, $\nu = 0,3$, $G = 80.000 \text{ MPa}$. Mặt cắt ngang cán dao $\Phi 56/\Phi 43 \text{ mm}$ được trình bày trên Hình 2, mô men quán tính: $J = \pi.(56^4 - 43^4)/32 = 629.800 \text{ mm}^4$.

Điều kiện biên: Cán dao chuốt một đầu

được ngàm chặt vào ụ dao, khi chuốt ụ dao vừa tịnh tiến vừa quay theo tỷ lệ bước xoắn, đầu kia lắp đầu chuốt di chuyển tự do trong lỗ, ống được gá cố định trên gá kẹp.



Hình 2. Mặt cắt ngang cán dao chuốt

Đầu gắn ụ dao - ngàm cứng.

Đầu tự do - chịu mô men xoắn $T = 270 \text{ N.m}$ phân bố đều trên mặt cắt.

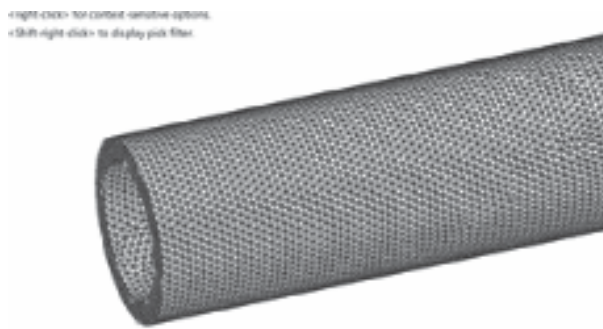
2.4. Chia lưới phần tử và kiểm tra hội tụ

Phần mềm sử dụng: ZW3D (module Simulation, phần tử khối bậc hai, tích phân rút gọn). Để kiểm tra hội tụ lưới, bốn mức kích thước phần tử được so sánh (Bảng 1).

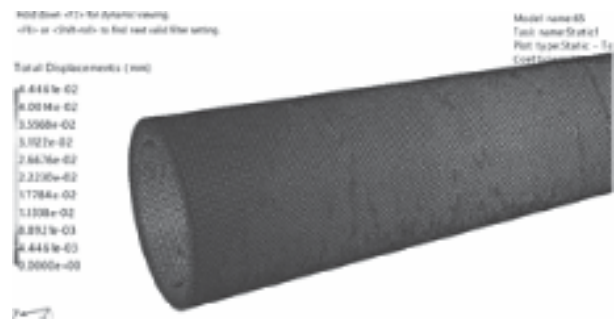
Bảng 1. Kiểm tra hội tụ lưới phần tử

Kích thước phần tử (mm)	$\tau_{\max}$ (MPa)	$u_{\max}$ (mm)
7	3,12	0,044
6	3,00	0,044
5	3,02	0,044
4	3,28	0,044

Kết quả Bảng 1 cho thấy khi giảm kích thước phần tử từ 6 mm xuống 5 mm, sự thay đổi của $\tau_{\max}$ và $u_{\max}$ nhỏ hơn 1%, xác nhận lưới 5 mm đã đạt hội tụ. Do đó, kích thước lưới 5 mm được lựa chọn cho các bước tính toán tiếp theo. Hình 3 minh họa lưới phần tử đã chọn.



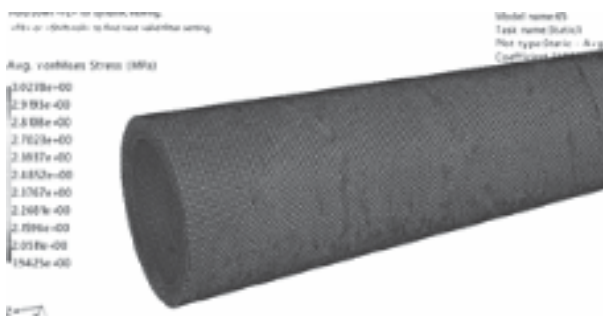
Hình 3. Lưới phần tử của cán dao chuốt



Hình 5. Biểu đồ chuyển vị

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân bố ứng suất



Hình 4. Biểu đồ phân bố ứng suất Von-Mises

Kết quả cho thấy ứng suất phân bố đồng đều dọc theo chiều dài cán dao và tập trung cực đại tại bề mặt ngoài ở vùng chuyển tiếp tiết diện. Ứng suất tiếp cực đại từ kết quả mô phỏng $\tau_{\max} = 3,02 \text{ MPa}$, giá trị này thấp hơn nhiều so với giới hạn chảy của thép 40CrMo4.

3.2. Biến dạng xoắn

Kết quả mô phỏng cho thấy chuyển vị tiếp tuyến cực đại tại đầu tự do của cán dao đạt $u_{\max} = 0,044 \text{ mm}$ tại bán kính ngoài $R = 28 \text{ mm}$. Chuyển vị tăng dần tuyến tính theo chiều dài trục, phù hợp với quy luật xoắn của ống trụ đàn hồi. Từ chuyển vị tiếp tuyến này, góc xoắn tương ứng được tính: $\theta = u_{\max}/R = 0,044/28 \sim 0,0015 \text{ (rad)} \sim 0^{\circ}5'9''$.

3.3. Sai lệch bước rãnh xoắn

Sai lệch bước xoắn trong 1 bước xoắn do biến dạng xoắn đàn hồi gây ra được tính theo công thức: $\Delta p = p \times \theta / (2\pi) = 2.100 \times 0,0015 / (2\pi) \approx 0,5 \text{ mm}$.

Như vậy, trên toàn bộ chiều dài lỗ $L = 2.400 \text{ mm}$, sai lệch bước xoắn tích lũy đạt khoảng $0,57 \text{ mm}$.

Kết quả phân tích cho thấy vấn đề khi chuốt rãnh xoắn của lỗ có chiều dài lớn, mặc dù ứng suất, biến dạng xoắn khá nhỏ, nhưng tích lũy trong quá trình chuốt vẫn có thể gây ra sai số hình học trong từng lần chuốt, đối với quá trình chuốt rãnh, thường sẽ có hàng chục lượt chuốt tùy theo chiều sâu rãnh, cũng như số lần phân độ tùy thuộc công suất thiết bị. Sai số tích lũy có thể gây ra hiện tượng dạng răng cưa ở trên thành rãnh, sai lệch vị trí rãnh ở đầu ra, để kiểm soát được sai lệch bước xoắn không ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm, chúng ta có thể có những lựa chọn các giải pháp điều chỉnh sau:

- Tăng/giảm lực cắt bằng cách tăng/giảm chiều dày cắt, vì chiều dày cắt ảnh hưởng đến thiết kế bán kính mũi dao, nếu bán kính mũi dao nhỏ hơn chiều dày cắt sẽ có hiện tượng trượt, tăng chiều dày cắt hợp lý giúp cho khả năng cắt của dao tốt hơn.

- Tăng/giảm độ cứng xoắn của cán dao bằng cách lựa chọn vật liệu chế tạo, kết cấu cán dao, kích thước cán dao phù hợp có thể giúp việc lắp đặt dao dễ dàng hơn, không gian chứa phoi rộng hơn, tăng cường khả năng bơm dung dịch vào vùng gia công và giảm chi phí gia công.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày quá trình mô phỏng phần tử hữu hạn về trạng thái chịu xoắn của cán dao chuốt rãnh xoắn trong trường hợp gia công thực tế với chi tiết cụ thể. Nghiên cứu đã chỉ ra tác động của sai lệch góc xoắn tích lũy biến thiên qua nhiều lượt cắt và phân độ có thể ảnh hưởng đến chất lượng cuối cùng của sản phẩm. Nghiên cứu này làm cơ sở cho việc tính toán lựa chọn vật liệu và kích thước cán dao tối ưu về kỹ thuật và kinh tế, tối ưu hóa việc lựa chọn chế độ công nghệ, và làm nền tảng cho việc xây dựng mô hình kiểm soát biến dạng xoắn tự động trong gia công, đồng thời làm cơ sở để tiếp tục nghiên cứu cho các nhiệm vụ tính toán chuốt các loại lỗ sâu có tỷ lệ L/D khác nhau cũng như các loại rãnh có bước xoắn biến đổi. ❖

Ngày nhận bài: **15/5/2026**

Ngày phản biện: **25/5/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ozturk, Erdem & Budak, Erhan, “*Modeling of 5-axis milling processes*”. Machining Science and Technology, Vol.11, pp. 287-311, 2007.
- [2]. V. Mautner, K. Horvat, M. Stoić, A. Stoić, “*A Simulation of Displacement of Cutting Tool Holders Used for Turning*”. Technologia i Automatyzacja Montażu, vol. 120, pp. 41-49, 2023.
- [3]. Trần Văn Địch, “*Công nghệ chế tạo máy*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, tr. 245-268, 2003.
- [4]. Raja Kountanya, Ibrahim Al-Zkeri, Taylan Altan, “*Effect of tool edge geometry and cutting conditions on experimental and simulated chip morphology in orthogonal hard turning of 100Cr6 steel*”. Journal of Materials Processing Technology, 2009.
- [5]. Stephenson, D.A., & Agapiou, J.S., “*Metal Cutting Theory and Practice (3rd ed.)*”. CRC Press, 2016.