

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA QUỸ ĐẠO CHẠY DAO ĐẾN ĐỘ NHÁM BỀ MẶT BẰNG MÔ PHỎNG TRÊN NX CAM

STUDY ON THE EFFECT OF TOOLPATH STRATEGIES ON SURFACE ROUGHNESS USING NX CAM SIMULATION

TS. Nguyễn Thị Thu Lê*, ThS. Lê Thị Minh Phương

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email: lentt.vck@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của quỹ đạo chạy dao đến độ nhám bề mặt khi phay tinh hợp kim nhôm trên phần mềm NX CAM, nhằm góp phần lựa chọn chế độ gia công hợp lý và nâng cao chất lượng bề mặt. Nghiên cứu được thực hiện bằng mô phỏng các quỹ đạo chạy dao trên NX12 với lượng chạy dao thay đổi từ 480 đến 2880 mm/ph. Kết quả cho thấy quỹ đạo chạy dao ảnh hưởng mạnh đến độ nhám bề mặt hơn lượng chạy dao. Trên cơ sở đó, xác định quỹ đạo chạy dao phù hợp cho từng dạng bề mặt thường gặp trong gia công, đồng thời xây dựng phương trình hồi quy để xác định giá trị Ra nhỏ nhất trong phạm vi nghiên cứu.

Từ khoá: Phay CNC; Quỹ đạo chạy dao; Độ nhám bề mặt; NX CAM; Bề mặt gia công.

ABSTRACT

This paper investigates the influence of toolpath strategy on surface roughness in the finish milling of aluminum alloy using NX CAM, with the aim of contributing to the selection of appropriate machining conditions and improving surface quality. The study was carried out by simulating toolpaths in NX12 with feed rates ranging from 480 to 2880 mm/min. The results show that toolpath strategy has a stronger effect on surface roughness than feed rate. Based on these findings, suitable toolpaths were identified for common surface types in machining, and a regression equation was developed to determine the minimum Ra value within the investigated range.

Keywords: CNC milling; Tool path strategy; Surface roughness; NX CAM; Machined surface.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong gia công phay, độ nhám bề mặt là một chỉ tiêu quan trọng phản ánh chất lượng bề mặt và khả năng làm việc của chi tiết cơ khí, đặc biệt đối với lĩnh vực gia công khuôn mẫu. Các tài liệu về NX CAM cũng khẳng định vai trò của việc lựa chọn quỹ đạo chạy dao phù hợp trong quá trình lập trình gia công [1], [2]. Một số công trình nghiên cứu đã đề cập đến ảnh hưởng của chiến lược quỹ đạo dao đến chất lượng bề mặt, như nghiên cứu trên thép AISI X210Cr12 [3], nghiên cứu của A. F. de Souza và cộng sự về ảnh hưởng của chiến lược quỹ đạo dao đến thời gian gia công thực [4], hay công trình của J. Balić về xây dựng quỹ đạo dao tối ưu nhằm cải thiện chất lượng bề mặt [5]. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu khác cũng đã phân tích trực tiếp các chiến lược chạy dao cho bề mặt tự do [6] và phát triển phương pháp tối ưu quỹ đạo chạy dao trong gia công các bề mặt này [7]. Tuy nhiên, phần lớn các công trình trên chủ yếu xem xét riêng lẻ yếu tố quỹ đạo chạy dao. Thực tế cho thấy, trong phay tinh, quỹ đạo chạy dao ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt thông qua hướng tạo vết cắt, mức độ chồng lấn giữa các vết dao và tính ổn định của quá trình cắt. Đồng thời, lượng chạy dao cũng tác động trực tiếp đến cơ chế hình thành nhám bề mặt do làm thay đổi khoảng cách và mức độ chồng lấp giữa các vết cắt liên tiếp của dao. Vì vậy, việc nghiên cứu ảnh hưởng kết hợp của quỹ đạo chạy dao và lượng chạy dao đến độ nhám bề mặt là cần thiết, qua đó cho phép đánh giá mức độ nhạy của độ nhám đối với từng yếu tố công nghệ. Trong nghiên cứu này, các quỹ đạo chạy dao được xây dựng và mô phỏng trên phần mềm Unigraphics NX 12, tốc độ cắt và chiều sâu cắt được giữ không đổi, trong khi lượng chạy dao được khảo sát ở ba mức khác nhau. Trên cơ sở đó, nghiên cứu tiến hành đánh giá ảnh hưởng của quỹ đạo chạy dao đến độ nhám bề mặt, phân tích độ nhạy của hai yếu tố

quỹ đạo chạy dao và lượng chạy dao, đồng thời xác định quỹ đạo phù hợp cho quá trình phay tinh chi tiết.

2. THIẾT KẾ THỰC NGHIỆM

2.1. Mô hình chi tiết và bề mặt gia công

Mô hình chi tiết được thiết kế đơn giản nhưng đại diện cho các dạng hình học thường gặp trong thực tế gia công, đồng thời thuận lợi cho việc lập trình CAM, gia công và đo nhám. Chi tiết nghiên cứu bao gồm các dạng bề mặt điển hình: bề mặt phẳng ngang, bề mặt thành đứng, bề mặt phẳng nghiêng và bề mặt cong. Đây là các dạng bề mặt phổ biến trong khuôn mẫu và chi tiết cơ khí chính xác, đồng thời có đặc điểm tiếp xúc dao và phôi khác nhau, dẫn đến cơ chế hình thành nhám bề mặt khác biệt.

- Bề mặt phẳng ngang hoặc đứng được sử dụng để đánh giá độ nhám trong điều kiện tiếp xúc ổn định giữa dao và phôi, thường gặp trong các nguyên công phay tinh mặt phẳng.

- Bề mặt nghiêng được lựa chọn nhằm xem xét ảnh hưởng của sự thay đổi góc tiếp xúc giữa dao và bề mặt gia công đến hướng vết cắt và sự chồng lấn quỹ đạo dao.

- Bề mặt cong đại diện cho các bề mặt có bán kính cong và điều kiện tiếp xúc biến thiên liên tục, ảnh hưởng mạnh đến quá trình tạo hình bề mặt. Để phù hợp với loại máy phay 3D dùng để gia công thực nghiệm, trong nghiên cứu này chỉ xét loại mặt cong đơn giản.

Kích thước các bề mặt được lựa chọn đủ lớn để đảm bảo quá trình gia công ổn định và cho phép đo độ nhám tại nhiều vị trí khác nhau, đồng thời tránh ảnh hưởng của vùng vào dao và thoát dao. Việc sử dụng chung một mô hình chi tiết cho cả ba dạng bề mặt giúp giảm

thiếu sai lệch do yếu tố hình học, đảm bảo rằng sự khác biệt về độ nhám bề mặt thu được chủ yếu xuất phát từ chiến lược chạy dao và đặc điểm bề mặt gia công, phù hợp với mục tiêu của nghiên cứu.

2.2. Thiết lập quỹ đạo dao trong NX CAM

Trong môi trường NX CAM, nghiên cứu sử dụng hai nhóm nguyên công chính là mill_planar và mill_contour được áp dụng cho

gia công các bề mặt phẳng, các bề mặt nghiêng và bề mặt cong gia công trên máy phay CNC 3 trục. Việc lựa chọn các nguyên công này phù hợp với đặc điểm hình học bề mặt và điều kiện thực nghiệm của nghiên cứu.

Với mỗi dạng bề mặt chọn 3 nhóm kiểu đi dao (bảng 1) đại diện có khác biệt rõ về hướng vết dao và tính liên tục. Thiết lập mô phỏng đường chạy dao cho bốn dạng bề mặt đại diện khi gia công khuôn mẫu.

Bảng 1. Các kiểu quỹ đạo dao

Dạng bề mặt	Nguyên công	Quỹ đạo chạy dao
Bề mặt phẳng ngang	Mill_planar	Zig-Zag: Chạy dao qua lại hai chiều; Zig: Chạy dao một chiều song song; Follow Periphery: Chạy theo biên dạng.
Bề mặt thành đứng	Mill_contour	Zlevel Profile: Chạy theo từng lớp; Follow Part: Dao bám theo hình dạng bề mặt chi tiết; Zig with contour: Chạy một chiều song song nối theo biên dạng.
Bề mặt nghiêng	Mill_contour	Streamline: Chạy theo hướng dòng của bề mặt. Contour Area: Chạy để quét hết vùng bề mặt. Area Milling: Cắt các vùng dốc lớn.
Bề mặt cong	Mill_contour	Streamline: Theo hướng dòng của bề mặt; Follow part: Bám theo hình dạng chi tiết; Spiral: Chạy theo đường xoắn.

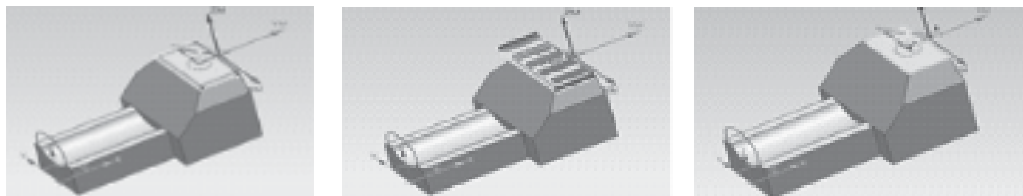
2.3. Điều kiện gia công

Thí nghiệm được thực hiện trên máy phay CNC vạn năng CN-VMC50, giới hạn gia công $500 \times 500 \times 400$ mm. Dụng cụ cắt sử dụng là dao phay ngón và dao phay cầu hợp kim cứng, đường kính $D = 12$ mm, số me cắt $z = 3$. Vật liệu gia công là hợp kim nhôm A6061 dạng phôi khối kích thước $154 \times 84 \times 85$ mm. Chế độ phay tinh được lựa chọn với tốc độ trục

chính $n = 8000$ vòng/phút, chiều sâu cắt $t = 0,1$ mm và ba mức lượng chạy dao răng thấp, trung bình và cao: $S_z = 0,02; 0,06; 0,12$ mm/răng, tương ứng lượng chạy dao phút sử dụng trong lập trình NC là $F = 480; 1440; 2880$ mm/phút. Dung dịch trơn nguội Emunxy 4% được phun trực tiếp vào vùng gia công với lưu lượng 20 lít/phút. Độ nhám bề mặt được đánh giá bằng máy đo độ nhám cầm tay SRT-6223 theo chỉ tiêu R_a , mỗi bề mặt đo tại ba vị trí đặc trưng. 

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng thực nghiệm thể hiện trên hình 1 đến hình 4, bảng 2 đến bảng 5.



Zig-Zag Zig Follow periphery
Hình 1. Mô phỏng đường chạy dao gia công mặt phẳng ngang

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm giá trị độ nhám bề mặt phẳng ngang

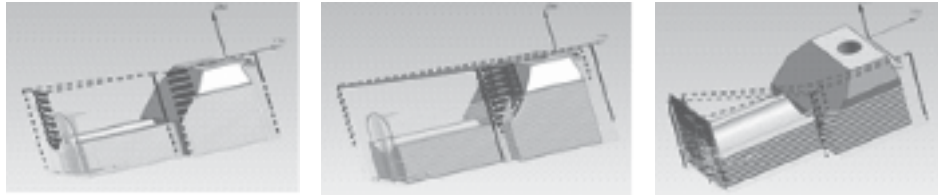
Quỹ đạo dao	F (mm/ph)	Ra lần 1	Ra lần 2	Ra lần 3	Ra trung bình (μm)
Zig-Zag	480	1,54	1,60	1,63	1,59
	1440	1,60	1,65	1,67	1,64
	2880	1,67	1,75	1,77	1,73
Zig	480	1,25	1,29	1,33	1,29
	1440	1,32	1,37	1,39	1,36
	2880	1,43	1,49	1,52	1,48
Follow periphery	480	0,75	0,79	0,83	0,79
	1440	0,82	0,87	0,89	0,86
	2880	0,92	0,93	0,97	0,94

Xây dựng hàm hồi quy tổng quát khi gia công mặt phẳng ngang, quỹ đạo dao Follow periphery là quỹ đạo chuẩn với các biến $D_1 = 0$; $D_2 = 0$; Zig $D_1 = 1$; $D_2 = 0$; Zig-Zag $D_1 = 0$; $D_2 = 1$.

$$R_a = 0,7566 + 6,67 \cdot 10^{-5} F + 0,5133 D_1 + 0,7900 D_2$$

Hệ số xác định của mô hình $R^2 \approx 0,9992$.

Với Follow periphery, bề mặt đạt chất lượng gia công tinh, nhưng với Zig-zag giá trị độ nhám đã chuyển sang bán tinh. Cho thấy quỹ đạo Follow periphery có hướng chạy dao bám sát biên dạng hơn, cắt êm hơn nên hạn chế các vết nhấp nhô bề mặt.



Zlevel Profile

Follow Part

Zig with contour

Hình 2. Mô phỏng đường chạy dao gia công mặt tường đứng

Bảng 3. Kết quả thực nghiệm giá trị độ nhám bề mặt thành đứng

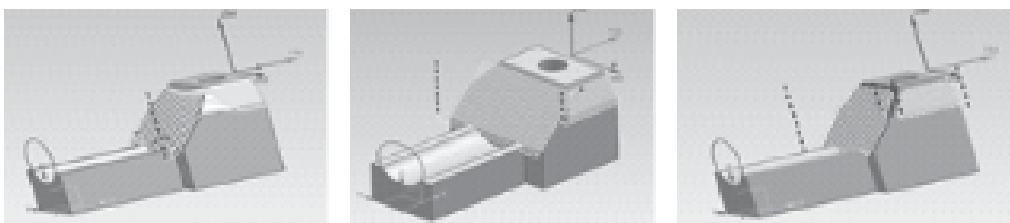
Quỹ đạo dao	F (mm/ph)	Ra lần 1	Ra lần 2	Ra lần 3	Ra trung bình (μm)
Zlevel Profile	480	0,79	0,83	0,81	0,81
	1440	0,91	0,95	0,90	0,92
	2880	0,97	1,01	0,96	0,98
Follow Part	480	1,57	1,64	1,62	1,61
	1440	1,62	1,72	1,71	1,68
	2880	1,72	1,82	1,80	1,78
Zig with contour	480	1,23	1,36	1,31	1,3
	1440	1,33	1,41	1,39	1,38
	2880	1,41	1,48	1,46	1,45

Xét quỹ đạo dao Zlevel Profile là quỹ đạo chuẩn với các biến $D_1 = 0$; $D_2 = 0$; Zig with contour $D_1 = 1$; $D_2 = 0$; Follow Part $D_1 = 0$; $D_2 = 1$. Hàm hồi quy có dạng:

$$R_a = 0,7963 + 6,689 \cdot 10^{-5}F + 0,4733D_1 + 0,7867D_2$$

Hệ số xác định của mô hình $R^2 \approx 0,9984$.

Đối với bề mặt thành đứng, quỹ đạo Zlevel Profile phù hợp hơn do đường chạy dao phân lớp theo phương Z, ổn định và thích hợp với dạng hình học vách đứng.



Streamline

Surface Contour

Area Milling

Hình 3. Mô phỏng đường chạy dao gia công mặt phẳng nghiêng



Bảng 4. Kết quả thực nghiệm giá trị độ nhám bề mặt nghiêng

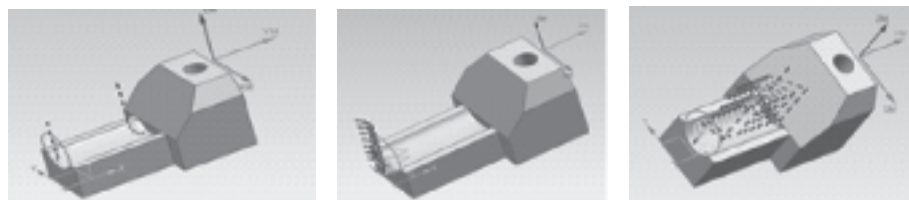
Quỹ đạo dao	F (mm/ph)	Ra lần 1	Ra lần 2	Ra lần 3	Ra trung bình (μm)
Streamline	480	1,01	1,10	1,04	1,05
	1440	1,19	1,33	1,29	1,27
	2880	1,28	1,46	1,43	1,39
Surface Contour	480	0,79	0,88	0,82	0,83
	1440	0,88	0,95	0,9	0,91
	2880	1,07	1,16	1,13	1,12
Area Milling	480	1,58	1,66	1,65	1,63
	1440	1,69	1,81	1,78	1,76
	2880	1,78	1,88	1,86	1,84

Với quỹ đạo dao Surface Contour là quỹ đạo chuẩn, các biến $D_1 = 0$; $D_2 = 0$; Streamline $D_1 = 1$; $D_2 = 0$; Area Milling $D_1 = 0$; $D_2 = 1$. Hàm hồi quy tổng quát có dạng:

$$R_a = 0,7694 + 1,15 \cdot 10^{-5} F + 0,2833 D_1 + 0,7900 D_2$$

Hệ số xác định $R^2 \approx 0,9898$.

Với bề mặt nghiêng, quỹ đạo Surface Contour phù hợp hơn vì đường chạy dao bám sát biên dạng bề mặt, giúp quá trình cắt ổn định và vết dao phân bố đều hơn.



Streamline

Follow part

Spiral

Hình 4. Mô phỏng đường chạy dao gia công bề mặt cong

Bảng 5. Kết quả thực nghiệm giá trị độ nhám bề mặt cong trên máy phay 3 trục

Quỹ đạo	F (mm/ph)	Ra lần 1	Ra lần 2	Ra lần 3	Ra trung bình (μm)
Streamline	480	1,29	1,2	1,26	1,25
	1440	1,35	1,31	1,36	1,34
	2880	1,57	1,52	1,59	1,56
Follow part	480	0,95	0,91	0,98	0,95
	1440	1,02	1,09	1,10	1,07
	2880	1,16	1,16	1,21	1,18
Spiral	480	1,64	1,62	1,65	1,63
	1440	1,77	1,73	1,78	1,76
	2880	1,88	1,83	1,90	1,87

Xét quỹ đạo dao Follow part là quỹ đạo chuẩn với các biến $D_1 = 0$; $D_2 = 0$; Streamline $D_1 = 1$; $D_2 = 0$; Spiral $D_1 = 0$; $D_2 = 1$. Hàm hồi quy tổng quát có dạng:

$$R_a = 0,8942 + 1,078 \cdot 10^{-5} F + 0,3167 D_1 + 0,6867 D_2$$

Với $R^2 \approx 0,9946$.

Trong ba quỹ đạo khảo sát, Follow part cho giá trị độ nhám nhỏ nhất ở cả ba mức chạy dao, trong khi Spiral và Streamline cho kết quả cao hơn và khá gần nhau.

Điều này cho thấy đối với bề mặt cong gia công trên máy phay 3 trục, quỹ đạo Follow part phù hợp hơn do đường chạy dao bám sát hình dạng thực của bề mặt, giúp vết cắt phân bố đều hơn.

4. KẾT LUẬN

Qua nghiên cứu mô phỏng và đánh giá ảnh hưởng của quỹ đạo chạy dao đến độ nhám bề mặt khi gia công trên NX CAM, có thể khẳng định rằng quỹ đạo chạy dao ảnh hưởng rõ rệt đến chất lượng bề mặt sau gia công. Kết quả khảo sát cũng cho thấy lượng chạy dao F là thông số công nghệ có tác động đáng kể đến độ nhám bề mặt R_a đối với tất cả các dạng bề mặt được nghiên cứu. Khi tăng lượng chạy dao từ 480 lên 2880 mm/ph, giá trị R_a đều tăng ở mọi quỹ đạo chạy dao, chứng tỏ lượng chạy dao càng lớn thì chất lượng bề mặt sau gia công càng giảm. Xu hướng này xuất hiện nhất quán trên bề mặt phẳng ngang, thành đứng, mặt nghiêng và mặt cong gia công trên máy phay 3 trục.

Kết quả nghiên cứu đồng thời cho thấy mỗi dạng bề mặt có một quỹ đạo chạy dao phù hợp riêng để đạt độ nhám bề mặt nhỏ hơn. Trong từng quỹ đạo khảo sát, khi lượng chạy dao tăng thì giá trị R_a đều tăng, cho thấy chất lượng bề mặt suy giảm theo cùng quy luật. So sánh mức

độ ảnh hưởng của hai yếu tố cho thấy quỹ đạo chạy dao có độ nhạy đối với độ nhám bề mặt lớn hơn so với lượng chạy dao. Đặc biệt, nghiên cứu đã xây dựng được hàm hồi quy biểu diễn quan hệ giữa độ nhám bề mặt R_a với quỹ đạo chạy dao và lượng chạy dao trong miền khảo sát, hệ số xác định mô hình gần bằng 1 cho phép dự đoán tin cậy và xác định giá trị R_a nhỏ nhất ứng với các điều kiện biên đã lựa chọn. Kết quả này là cơ sở tham khảo có ý nghĩa cho việc lựa chọn quỹ đạo chạy dao hợp lý và chế độ công nghệ phù hợp nhằm nâng cao chất lượng gia công tinh trên phần mềm NX CAM.

Kiến nghị: Nghiên cứu ảnh hưởng tổng hợp của quỹ đạo chạy dao và chế độ cắt trên các bề mặt tự do phức tạp, đặc biệt trong gia công 5 trục.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số DT25-26.47. ❖

Ngày nhận bài: 05/3/2026

Ngày phản biện: 19/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Siemens PLM Software, “NX CAM for Machinery: Optimized NC Programming for Machinery and Heavy Equipment”. Product brochure.
- [2]. M. C. Leu và nnk., “NX 12 for Engineering Design”. Missouri University of Science and Technology, 2019.
- [3]. M. Uzun và nnk., “Influence of tool path strategies on machining time, tool wear, and surface roughness”. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2022.
- [4]. A. F. de Souza và nnk., “Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application”. Procedia CIRP, 2014.
- [5]. J. Balič, “Intelligent tool path generation for milling of free surfaces using neural networks”. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002.
- [6]. C. Vila và nnk., “Analysis of Different Tool Path Strategies for Free Form Machining with Computer Aided Surface Milling Operations”. Procedia Manufacturing, 2019.
- [7]. I. Lazoglu, Y. Manav, “Tool path optimization for free form surface machining”. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2009.