

NGHIÊN CỨU VỀ ĐỘ CHÍNH XÁC TẠO HÌNH VÀ THỜI GIAN GIA CÔNG KHI PHAY CNC BỀ MẶT CẤU TRÚC TÂM LỒM

STUDY ON FORMING QUALITY AND MACHINING TIME WHEN CNC MILLING THE SURFACE WITH LOCAL CONCAVE UMBILICAL STRUCTURE

Bùi Ngọc Tuyên^{1,*}DOI: <http://doi.org/10.57001/huic5804.2024.130>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của một số thông số công nghệ (tốc độ cắt, bước tiến dao răng, kiểu đường chạy dao) đến độ chính xác tạo hình và thời gian gia công khi phay tinh bề mặt cấu trúc tâm lõm. Mô hình mẫu thực nghiệm có bề mặt cấu trúc tâm lõm được thiết kế trên cơ sở quét bề mặt trong pha đèn pin. Thực nghiệm được tiến hành theo thiết kế ma trận trực giao Taguchi $O_A(3^3)$ và phân tích phương sai (ANOVA). Các kết quả nghiên cứu cho thấy khi phay tinh bề mặt có cấu trúc tâm lõm, kiểu đường chạy dao và tốc độ chạy dao răng có ảnh hưởng rất lớn đến độ chính xác tạo hình (lần lượt là 44,3% và 42%), Ảnh hưởng của tốc độ cắt ảnh hưởng khá nhỏ (12,6%). Trong khi đó, ảnh hưởng của tốc độ cắt, tốc độ chạy dao răng và kiểu đường chạy dao đến thời gian gia công khá tương đồng (lần lượt là 36,4%; 34,1% và 29,3%). Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy khi gia công bề mặt dạng này nên chọn chế độ gia công nào là phù hợp nhất tùy theo chỉ tiêu đầu ra là chất lượng tạo hình hay thời gian gia công.

Từ khóa: Bề mặt có cấu trúc tâm lõm, tốc độ cắt, tốc độ chạy dao răng, kiểu đường chạy dao, Taguchi, ANOVA, độ chính xác tạo hình, thời gian gia công.

ABSTRACT

This article presents an experimental study on the effects of some technological parameters (cutting speed, tooth feed, tool path type) on shaping accuracy and machining time when finishing milling surfaces with concave center structure. The experimental model has a concave center structure surface designed on the basis of scanning the inner surface of the flashlight reflector. Experiments were conducted according to Taguchi $O_A(3^3)$ orthogonal matrix design and analysis of variance (ANOVA). Research results show that when finishing milling a surface with a concave umbilical structure, the type of tool path and tooth feed speed have a great influence on shaping accuracy (44.3% and 42%, respectively). The influence of cutting speed is quite small (12.6%). Meanwhile, the effects of cutting speed, feed per tooth and tool path type on machining time are quite similar (36.4%, 34.1% and 29.3% respectively). Research results also show that when machining this type of surface, depending on the output criteria such as forming quality or machining time, it is necessary to choose the most suitable set of machining parameters.

Keywords: Surface with concave umbilical structure, cutting speed, feed per tooth, tool path type, Taguchi, ANOVA, forming quality, machining time.

¹Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: tuyen.buingoc@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/02/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/4/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2024

1. GIỚI THIỆU

Bề mặt tự do (Free form surface) được sử dụng rộng rãi trong thiết kế cơ khí: khuôn mẫu, các bộ phận khí động học,... Chúng được cấu thành từ mười vùng bề mặt cục bộ. Một trong những cấu trúc cục bộ điển hình là cấu trúc tâm lõm [1]. Cấu trúc này có dạng mặt tròn xoay với đặc điểm hình học cơ bản là các độ cong chính bằng nhau và âm: $k_{1,p} = k_{2,p} = k_p < 0$; do đó độ cong trung bình sẽ âm và độ cong Gauss dương: $H = (K_{(1,p)} + K_{(2,p)})/2 < 0$; $K = k_{(1,p)} \cdot k_{(2,p)} > 0$.

Ví dụ tạo một vùng bề mặt cấu trúc tâm lõm bằng cách sử dụng phần mềm NX12 mô hình hóa một vùng mặt tròn xoay $P(u,v)$ tạo bởi một parabol $G(u)$ quay quanh trục Oz.

$$G(u) = \begin{bmatrix} 40u - 20 \\ 0 \\ 160u^2 - 160u + 40 \end{bmatrix}; \quad (0 \leq u \leq 1)$$

Đường cong này có thể biểu diễn dưới dạng chính tắc $z = 0,1x^2$

Bán kính cong của đường cong parabol trên có thể tính theo công thức:

$$r = \frac{\left[1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}}{d^2z/dx^2} \quad (*)$$

Phương trình tham số của vùng bề mặt tạo ra $P(u,v)$:

$$P(u,v) = \begin{bmatrix} (40u - 20) \cdot \cos(v) \\ (40u - 20) \cdot \sin(v) \\ 160u^2 - 160u + 40 \end{bmatrix};$$

$(0 \leq u \leq 1), (0 \leq v \leq 2\pi)$

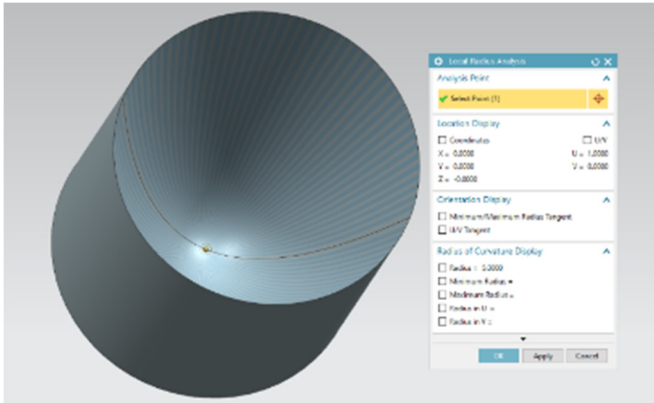
Tại điểm $O(0;0;0)$ thuộc mặt P ta có:

$$K_{1,p} = K_{2,p} = K_p = -\frac{1}{5} = -0,2$$

$$\rightarrow \begin{cases} H = \frac{K_{1,p} + K_{2,p}}{2} = -0,2 < 0 \\ K = K_{1,p} \cdot K_{2,p} = 0,04 > 0 \end{cases}$$

Đây là vùng bề mặt cấu trúc tâm lõm. Bề mặt này có độ cong lớn nhất, với bán kính cong nhỏ nhất tại điểm đỉnh là

$r_{min} = 5$. Do vậy để tạo hình chính xác cần chọn dao phay ngón đầu cầu có bán kính nhỏ hơn 5mm [2].



Hình 1. Ví dụ mô hình bề mặt cấu trúc tâm lõm

Bề mặt cấu trúc tâm lõm được sử dụng nhiều trong thiết kế các chi tiết cơ khí, cũng như các sản phẩm gia dụng. Đặc biệt một số bề mặt cấu trúc tâm lõm yêu cầu độ chính xác tạo hình cao như các bề mặt pha đèn, chóa đèn pin, gương parabol lõm, bề mặt một số lòng khuôn, mẫu. Khi gia công các bề mặt cong lõm trong các khoang, hốc việc lựa chọn dụng cụ như các thông số gia công sẽ tác động trực tiếp đến độ chính xác tạo hình cũng như thời gian gia công. Nghiên cứu lựa chọn các thông số gia công khi phay CNC đến độ chính xác tạo hình và thời gian gia công bề mặt cấu trúc tâm lõm là thực sự cần thiết. Các nghiên cứu có liên quan trực tiếp đến hướng nghiên cứu này chưa nhiều. Trong [3] có trình bày một nghiên cứu thực nghiệm bề mặt parabol $y = 30 - 0,048x^2$ khi tạo hình trên máy phay CNC 3 trục bằng dao đầu cầu. Kết quả của nghiên cứu này đưa ra đánh giá về độ nhám bề mặt đạt được với ba loại đường chạy dao: spiral, constant z level, lining. Bài báo [4] trình bày một nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của ba yếu tố đường chạy dao (toolpath), bước dịch dao (side step) và đường kính dao đến độ chính xác hình học của bề mặt cánh bơm hướng trục khi gia công trên máy phay CNC 3 trục bằng dao phay đầu cầu. Nghiên cứu cho thấy ảnh hưởng của kiểu đường chạy dao là lớn nhất (49,65%), tiếp theo là bước dịch dao ngang (36,78%) và cuối cùng là đường kính dao (10,60%). Một nghiên cứu thực nghiệm khác về ảnh hưởng của tốc độ tiến dao, bước dịch dao và kiểu đường chạy dao đến độ chính xác hình học của bề mặt có cấu trúc cục bộ yên ngựa [5]. Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của kiểu đường chạy dao cũng lớn nhất với gần 52%, tiếp theo là bước dịch dao (31,8%) và cuối cùng là tốc độ tiến dao (10,1%). Ảnh hưởng của đường chạy dao đến chất lượng bề mặt và độ chính xác tạo hình khi phay CNC hốc cũng được giới thiệu trong nghiên cứu [6]. Nghiên cứu đã đưa ra các kết quả đánh giá về độ nhám bề mặt, độ chính xác hình học và cấu trúc tế vi của bề mặt gia công cho bốn trường hợp ứng với bốn kiểu chạy dao (constant Z, circular pocket, constant stepover pocket auto border, and spiral). Trong tài liệu tham khảo [7], các tác giả đã nghiên cứu về chất lượng bề mặt tự do gia công bằng phay CNC 3 trục và 5 trục với 3 kiểu đường chạy dao (linear, offset, and spiral). Các kết quả công bố ở đây cho

thấy trong cả ba trường hợp chạy dao gia công 5 trục cho độ chính xác tạo hình cao hơn hẳn so với gia công 3 trục. Chất lượng tạo hình bề mặt tự do cũng được nghiên cứu trong [8]. Ảnh hưởng của bước tiến ngang, lượng chạy dao răng, số răng dao, hướng phay đến độ nhám bề mặt gia công được trình bày trong công bố này. Ngoài các công bố có liên quan trực tiếp đến hướng nghiên cứu trong bài báo này, còn có các nghiên cứu đưa ra các giải pháp tạo hình, giải pháp tối ưu hóa các thông số gia công cho các bề mặt tự do phức hợp gồm nhiều vùng bề mặt cấu trúc cục bộ,... Chẳng hạn như giải pháp phân vùng một bề mặt tự do có cấu trúc phức tạp thành các vùng bề mặt cục bộ để lựa chọn dụng cụ và đường chạy dao thích hợp với từng vùng bề mặt [9]. Giải pháp này làm giảm đáng kể thời gian gia công và nâng cao độ chính xác tạo hình. Nghiên cứu [10] cũng đưa ra giải pháp dựa trên tiếp xúc đường bậc hai của bề mặt dụng cụ và bề mặt gia công, thông qua gia công thích nghi theo độ cong để lập kế hoạch đường chạy dao khi gia công bề mặt tự do. Ngoài ra còn có các nghiên cứu tối ưu hóa các thông số gia công khi phay CNC bề mặt tự do dựa trên phương pháp Taguchi và phân tích phương sai hoặc kết hợp phương pháp này với phân tích quan hệ xám (GRA) cũng đã được công bố trong các công trình [11-14]. Qua tìm hiểu tổng quan ở trên, có thể thấy rằng có rất ít các công bố có liên quan trực tiếp đến tạo hình bề mặt tự do có cấu trúc cục bộ tâm lõm. Chủ yếu là các nghiên cứu liên quan đến tạo hình một bề mặt tự do cụ thể theo lựa chọn của tác giả. Do vậy các nghiên cứu này có ý nghĩa khoa học nhiều hơn so với ý nghĩa thực tiễn.

Bài báo này trình bày một nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của ba thông số công nghệ (tốc độ cắt, tốc độ chạy dao răng và kiểu đường chạy dao) đến độ chính xác tạo hình và năng suất gia công khi gia công bề mặt cấu trúc tâm lõm bằng dao phay đầu cầu trên máy CNC 3 trục. Mô hình bề mặt bên trong của chóa đèn pin xây dựng bằng kỹ thuật ngược được sử dụng để thiết kế mẫu thí nghiệm có cấu trúc cục bộ tâm lõm. Quy hoạch thực nghiệm Taguchi 3 yếu tố, 3 mức $OA_3(3^3)$ và phân tích phương sai (ANOVA) [15] với phần mềm thống kê Minitab [16] được sử dụng cho triển khai nghiên cứu này. Các kết quả nghiên cứu ở đây cho phép lựa chọn được các bộ thông số gia công phù hợp với từng chỉ tiêu độ chính xác tạo hình hay thời gian gia công, dự đoán được độ chính xác tốt nhất cũng như thời gian gia công nhỏ nhất. Mức độ ảnh hưởng của các thông số gia công đến các chỉ tiêu đầu ra cũng được xác định cụ thể.

2. THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

2.1. Xây dựng mô hình thực nghiệm

Thiết bị gia công: Máy phay CNC DX-6080 của hãng WANTAI (Đài Loan) với một số đặc tính kỹ thuật cơ bản như sau: kích thước bàn máy 600 x 800 (mm), Công suất động cơ trục chính 5,5kW, tốc độ trục chính 600 - 18000 vòng/phút, tốc độ chạy dao gia công lớn nhất 6000 mm/phút, độ định vị chính xác lặp lại: 0,005mm

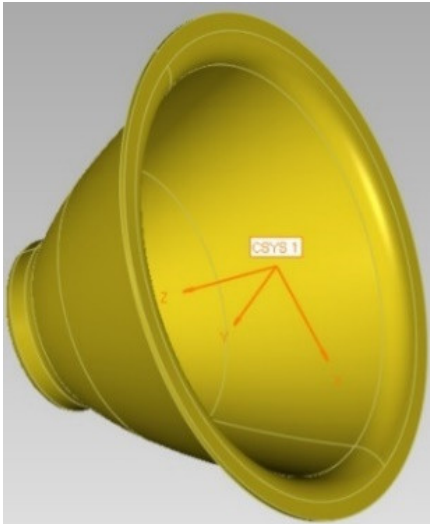
Dụng cụ: Dao phay đầu cầu $\Phi 10$ ký hiệu R5xD10x75Lx2F của hãng G.T. cutting tools (Đài Loan) dùng cho bước phay tinh.

Phôi: Hợp kim nhôm A6061

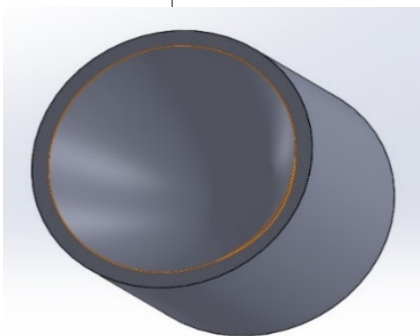
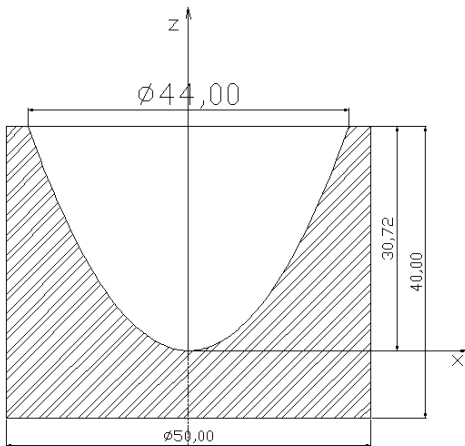
Phần mềm CAM: NX12

Thiết bị đo: Máy quét laser SIMSCAN của SCANTECH (HANGZHOU) CO., LTD với sử dụng chùm laze ánh sáng xanh với độ chính xác 0,02mm, độ phân giải đến 0,025mm, vùng quét có thể tới 410 × 400mm.

Mẫu thực nghiệm:



Hình 2. Mô hình 3D chóa đèn pin

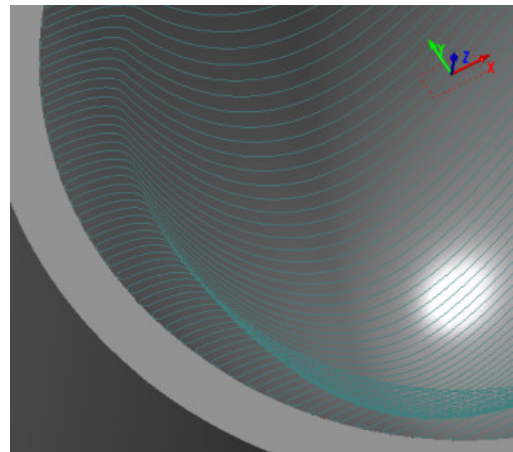


Hình 3. Bản vẽ và mô hình 3D mẫu thực nghiệm

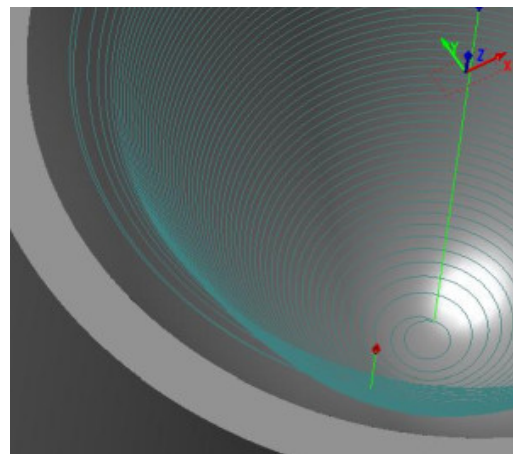
Mô hình bề mặt chóa đèn pin được thiết kế lại trên cơ sở số hóa bề mặt mẫu bằng cách sử dụng thiết bị quét laser SIMSCAN. Dữ liệu đám mây điểm bề mặt của chóa đèn được đưa vào phần mềm Geomagic để tạo ra mô hình 3D của

chóa đèn (hình 2). Bề mặt trong của mô hình được xác định là một bề mặt tròn xoay có dạng cấu trúc tâm lõm với đường sinh tạo hình là đường parabol có phương trình $z = 0,0635x^2$. Bề mặt này được dùng thiết kế mẫu thực nghiệm có bản vẽ chế tạo và mô hình 3D như trên hình 3. Bề mặt này có độ cong lớn nhất tại đỉnh parabol với bán kính cong xác định theo (*): $r_{min} = 7,87mm$. Để tạo hình bề mặt không bị cắt lẹm và lượng dư để lại ít nhất, cần chọn dao phay ngón đầu cầu với bán kính nhỏ hơn r_{min} .

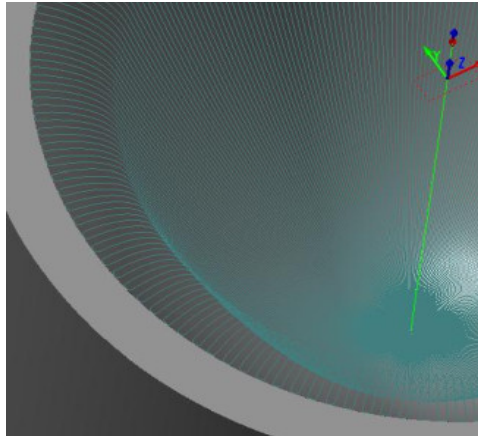
Quá trình gia công tạo phôi mẫu thực nghiệm được tiến hành như sau: Tiện ngoài, xén mặt đầu phôi hợp kim nhôm A6061 → Phay thô lòng mẫu bằng dao cầu $\Phi 14$ → Phay bán tinh bằng dao $\Phi 12$ để lại lượng dư bề mặt 0,1mm cho phay tinh. Quá trình thực nghiệm phay tinh được thực hiện bằng dao đầu cầu $\Phi 10$ theo kế hoạch thực nghiệm thiết kế trên cơ sở ma trận trực giao Taguchi $OA_9(3^3)$ với 3 yếu tố là tốc độ cắt V , lượng chạy dao răng F_z và kiểu đường chạy dao T_p . Các yếu tố và các mức thực nghiệm được trình bày trong bảng 1. Trên hình 4 là ba kiểu đường chạy dao được sử dụng trong nghiên cứu này. Các điều kiện công nghệ còn lại không đổi cho cả 9 mẫu: bước tiến ngang (Side step) = 0,1mm, chiều sâu cắt $t = 0,1mm$, tưới dung dịch trơn nguội. Các chỉ tiêu đầu ra của quy hoạch thực nghiệm này là độ chính xác tạo hình được đánh giá bằng sai số hình học bề mặt mẫu chế tạo so với bề mặt mẫu thiết kế và thời gian gia công tinh.



Zigzag (parallel)



Concentric



Radial

Hình 4. Ba kiểu đường chạy dao

Bảng 1. Các yếu tố và các mức

Các yếu tố	Levels		
	1	2	3
Tốc độ cắt V (m/phút)	100	200	300
Tốc độ chạy dao răng Fz (mm/răng)	0,02	0,04	0,06
Kiểu đường chạy dao Tp	Zigzag	Concentric	Radial

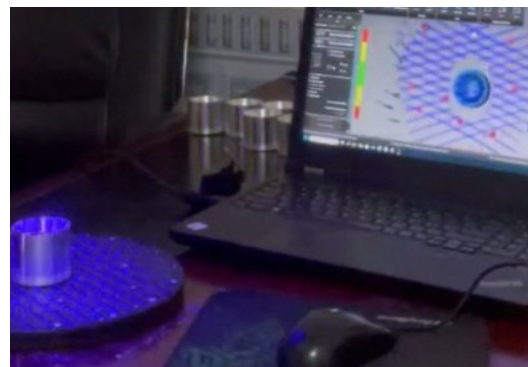
Gia công thô, bán tinh và tinh mẫu được thực hiện trên máy phay CNC 3 trục DX-6080 (hình 5), Các mẫu gia công xong (hình 6) được số hóa bề mặt lòng mẫu bằng máy quét 3D cầm tay SIMSCAN (hình 7). Sử dụng 9 tệp dữ liệu đám mây điểm này đăng nhập lần lượt với bề mặt mô hình CAD thiết kế để xác định sai số hình học của các mẫu thông qua công cụ Geomagic Quality 2003. Tiêu chí đánh giá sai số hình học là độ lệch trung bình được xác định theo công thức: độ lệch trung bình = (dev trên - dev dưới)/2. Ví dụ như với kết quả đo sai số hình học của mẫu 1 được trình bày trên hình 8. Mẫu này có giá trị sai lệch trung bình mức cao là: dev trên = +0,0149mm, giá trị sai lệch trung bình mức thấp là dev dưới = -0,0104mm nên độ lệch trung bình bề mặt sẽ là (0,0149 + 0,0104)/2 = 0,01265 (mm) = 12,65 (µm).



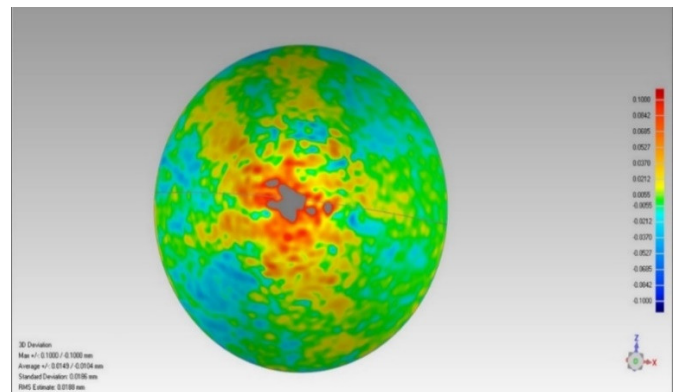
Hình 5. Gia công mẫu



Hình 6. Các mẫu gia công



Hình 7. Số hóa bề mặt mẫu



Hình 8. Sai số hình học của mẫu số 1

Các số liệu tổng hợp về thời gian gia công và sai số hình học gia công được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm thu được theo ma trận trực giao Taguchi OA₉(3³)

N ^o	V (m/phút)	fz (mm/răng)	Kiểu chạy dao Tp	Sai số gia công Δ (µm)	(S/N) _Δ	Thời gian gia công T (phút)	(S/N) _T
1	100	0,02	Zigzag	12,65	-2,042	177	-14,8073
2	100	0,04	Concentri	11,85	-1,474	92	-15,9868
3	100	0,06	Radial	12,7	-2,076	143	-22,9226
4	200	0,02	Concentri	10,45	-0,214	89	-16,5215

5	200	0,04	Radial	10,85	-0,709	109	-19,3697
6	200	0,06	Zigzag	15,15	-3,608	33	-12,0412
7	300	0,02	Radial	11,6	-1,289	145	-19,3697
8	300	0,04	Zigzag	14,4	-3,167	29	-10,8814
9	300	0,06	Concentric	14	-2,923	19	-15,5630

2.2. Phân tích đánh giá về độ chính xác tạo hình

Độ chính xác tạo hình được đánh giá thông qua chỉ tiêu sai số gia công. Sai số gia công càng nhỏ, độ chính xác tạo hình càng cao. Theo lựa chọn đầu ra càng nhỏ càng tốt (Smaller is Beter) xác định được tỷ số S/N cho từng thí nghiệm. Tỷ số S/N trung bình cho từng yếu tố ở mức 1, 2 và 3 có thể tính được bằng cách lấy trung bình tỷ số S/N cho các thí nghiệm tương ứng. Ảnh hưởng của từng yếu tố đến sai số hình học bề mặt gia công được xác định bằng Minitab như trong hình 9. Tỷ số S/N cao cho sai số hình học nhỏ hơn. Phân tích phương sai (bảng 3) cho thấy hệ số quyết định khá cao (98,81% và 95,28%), cho thấy mô hình phù hợp với dữ liệu.

Thông qua dữ liệu trong bảng này cũng xác định được ảnh hưởng của từng yếu tố đến độ chính xác gia công. Kiểu đường chạy dao Tp có ảnh hưởng lớn nhất (44,3%), tiếp theo là ảnh hưởng của tốc độ chạy dao răng Fz (42%), ảnh hưởng của tốc độ cắt V nhỏ nhất (12,6%) (bảng 4). Qua đây có thể thấy kiểu đường chạy dao và tốc độ chạy dao răng ảnh hưởng đến độ chính xác tạo hình rất lớn so với ảnh hưởng của tốc độ cắt. Điều này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết cắt gọt kim loại. Kiểu đường chạy dao và tốc độ chạy dao răng là những yếu tố ảnh hưởng hình học có ảnh hưởng trực tiếp đến các nhấp nhô hình học để lại (scallops). Tốc độ cắt chủ yếu tác động đến sai số hình học do các cơ chế biến dạng vật lý (biến dạng dẻo dẫn đến phá hủy, biến dạng đàn hồi, biến dạng nhiệt,...).

Với giá trị S/N càng lớn càng tốt ta có thể chọn được bộ thông số tối ưu là V₂Fz₁Tp₃. Các thông số cắt tối ưu để có độ chính xác hình học tốt nhất của bề mặt gia công là tốc độ cắt V = 200 m/phút, Tốc độ chạy dao răng Fz = 0,02 mm/răng và kiểu đường chạy dao Tp = Radial.

Sai số hình học nhỏ nhất đạt được trong trường hợp này, có thể dự đoán theo [15] như sau:

$$\Delta_{min} = \bar{\Delta}(V_2) + \bar{\Delta}(Fz_1) + \bar{\Delta}(Tp_3) - 2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n}$$

$$= 12,15 + 11,57 + 11,72 - 2 \cdot \frac{2.113,65}{9} \approx 10,2 (\mu m)$$

Kết quả gia công kiểm nghiệm lại với chế độ gia công tối ưu trên cho giá trị sai số bề mặt mẫu là Δ = 10,38 (μm). Sai số so với dự đoán khoảng 1,8%.

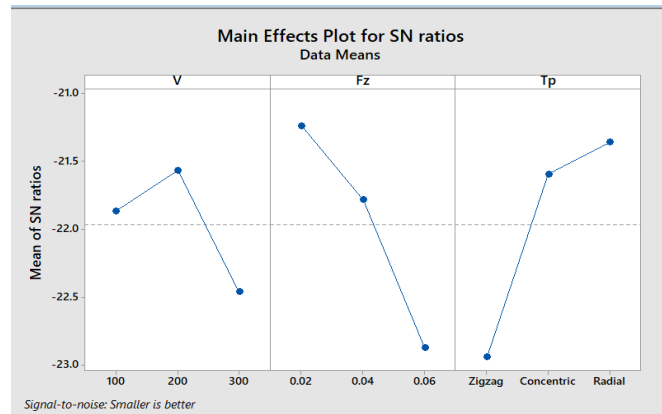
Bảng 3. Phân tích phương sai cho tỷ số (S/N)_Δ

Model Summary R-Sq = 98,8%, R-Sq(adj) = 95,28%						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
V	2	1,2413	1,2413	0,62063	10,67	0,086
Fz	2	4,1370	4,1370	2,06848	35,55	0,027

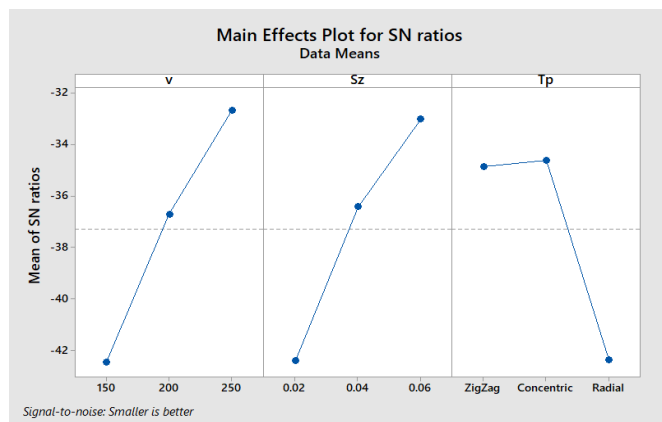
Tp	2	4,3671	4,3671	2,18357	37,53	0,026
Residual Error	2	0,1164	0,1164	0,05818		
Total	8	9,8617				

Bảng 4. Ảnh hưởng của các yếu tố đến độ chính xác tạo hình

Nº	Yếu tố	Mức độ ảnh hưởng, %
1	Tốc độ cắt (S)	12,6
2	Tốc độ chạy dao răng (Fz)	42
3	Kiểu đường chạy dao (Tp)	44,3
4	Nhiều	1,1



Hình 9. Ảnh hưởng chính đến các tỷ số (S/N)_Δ



Hình 10. Ảnh hưởng chính đến các tỷ số (S/N)_T

2.3. Phân tích đánh giá về thời gian gia công

Các yếu tố đầu vào (tốc độ cắt V, lượng chạy dao răng Fz và kiểu đường chạy dao Tp) cũng là những thông số công nghệ chính ảnh hưởng đến thời gian gia công tinh. Chiều sâu cắt trong gia công tinh thường chọn rất nhỏ nên tác động không nhiều đến thời gian gia công. Lựa chọn cho đặc tính chỉ tiêu đầu ra ở đây cũng giống như trường hợp trên là càng nhỏ càng tốt. Do vậy các tính toán phân tích cũng được thực hiện tương tự trên. Ảnh hưởng của từng yếu tố đến thời gian gia công được trình bày trong hình 10. Thông qua phân tích phương sai bằng 5 xác định được ảnh hưởng của từng yếu tố đến thời gian gia công. Tốc độ cắt V có ảnh hưởng lớn nhất (36,4%), tiếp theo là ảnh hưởng của tốc độ chạy dao răng Fz (34,1%), ảnh hưởng của kiểu đường chạy dao Tp nhỏ

nhất (29,3%) (bảng 6). Tuy nhiên mức độ ảnh hưởng của 3 yếu tố này đến thời gian gia công không khác nhau nhiều. Kết quả này cũng có thể giải thích là do tốc độ cắt và tốc độ chạy dao là các yếu tố tác động trực tiếp đến tốc độ bóc tách vật liệu (thể tích vật liệu bóc ra trong một đơn vị thời gian). Kiểu đường chạy dao sẽ quyết định đến chiều dài đường chạy dao, cũng là yếu tố tác động trực tiếp đến tốc độ bóc tách kim loại.

Các thông số cắt tối ưu để có năng suất gia công lớn nhất là tốc độ cắt $V = 300$ m/phút, Tốc độ chạy dao răng $Fz = 0,06$ mm/răng và kiểu đường chạy dao $Tp = \text{Concentric}$.

Bộ thông số gia công này tương ứng với thí nghiệm gia công mẫu N^o.9 sẽ cho thời gian gia công nhỏ nhất $T_{\min} = 19$ phút. Thời gian gia công cũng là yếu tố cơ bản ảnh hưởng trực tiếp đến năng suất gia công. Do vậy có thể xem ở chế độ gia công này năng suất gia công là lớn nhất.

Bảng 5. Phân tích phương sai cho tỷ số $(S/N)_T$

Model Summary R-Sq = 98,8%, R-Sq(adj) = 95,28%						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
V	2	144,489	144,489	72,2447	266,67	0,004
Fz	2	135,092	135,092	67,5458	249,33	0,004
Tp	2	116,367	116,367	58,1833	214,77	0,005
Residual Error	2	0,542	0,542	0,2709		
Total	8	396,489				

Bảng 6. Ảnh hưởng của các yếu tố đến thời gian gia công

N ^o	Yếu tố	Mức độ ảnh hưởng, %
1	Tốc độ cắt (S)	36,4
2	Tốc độ chạy dao răng (Fz)	34,1
3	Kiểu đường chạy dao (Tp)	29,3
4	Nhiều	0,2

3. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày một nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của các thông số công nghệ (tốc độ cắt, tốc độ chạy dao răng và kiểu đường chạy dao đến độ chính xác tạo hình và năng suất gia công khi phay tinh bề mặt tự do có cấu trúc cục bộ tâm lõm trên máy phay CNC 3 trục. Mô hình mẫu thực nghiệm được thiết kế ngược trên cơ sở quét mẫu chóa đèn pin. Dụng cụ tạo hình là dao phay ngón đầu cầu với bán kính được xác định trên cơ sở xác định bán kính cong nhỏ nhất của bề mặt. Nghiên cứu sử dụng phương pháp Taguchi kết hợp phân tích phương sai (ANOVA) cho phép đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố đến chỉ tiêu đầu ra, cũng như cho phép xác định được chế độ gia công tối ưu với từng chỉ tiêu đầu ra. Kết quả cho thấy khi gia công mẫu có bề mặt tự do với cấu trúc cục bộ tâm lõm, kiểu đường chạy dao và tốc độ chạy dao răng có ảnh hưởng rất lớn đến độ chính xác tạo hình còn tốc độ cắt có ảnh hưởng khá nhỏ. Trong khi với chỉ tiêu đầu ra là thời gian gia công thì ảnh hưởng của ba thông số gia công này là khá tương đồng. Nghiên cứu cũng xác

định được các bộ thông số tối ưu cho từng chỉ tiêu đầu ra, cũng như dự đoán được giá trị tối ưu đạt được của các chỉ tiêu đầu ra này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Stephen P. Radzevich, *Kinematic geometry of surface machining*. CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, 2008

[2]. Byoung K. Choi, Robert B. Jerard, *Sculptured Surface Machining - Theory and applications*. © 1998 Springer Science+Business Media Dordrecht, Originally published by Kluwer Academic Publishers in 1998

[3]. Beňo J., Tomáš M., Ižol P., Varga J., "Analysis of the free form surface milling based on a fragmentation approach," *Journal of Production Engineering*, 18, 2015.

[4]. Bui N.T., Ngo D.L., "An experimental study of 3 axes CNC milling for a blade of the axial flow pump impeller," In *MMMS 2020. LNME*, 330-336, Springer, Cham, 2021.

[5]. Hoang Van Quy, Bui Ngoc Tuyen, "Effect of feed rate, tool path and step over on geometric accuracy of freeform surfaces when 3 axis CNC milling," *Applied Mechanics and Materials*, 889, 2019.

[6]. Ján Varga, Teodor Tóth, Luboš Kaščák, Emil Spišák, "The Effect of the Machining Strategy on the Surface Accuracy When Milling with a Ball End Cutting Tool of the Aluminum Alloy AlCu4Mg," *Appl. Sci.* 12, 10638, 2022.

[7]. Zuzana Grešová, Peter Ižol, Marek Vrabel, Luboš Kaščák, Jozef Brindza, Michal Demko, "Influence of Ball-End Milling Strategy on the Accuracy and Roughness of Free Form Surfaces," *Appl. Sci.* 12, 4421, 2022.

[8]. Mikó B, Baranyai G., "Comparision of milling strategies in case of free form surface milling," *Development in machining technology*, Ed.: W. Zebala, I. Manková; Cracow University of Technology, Cracow, 6, 76-86, 2016.

[9]. Bui Ngoc Tuyen, Hoang Van Quy, Duc-Toan Nguyen, "A Study on Partitioning Freeform Surface and Tool Selection Method for 3-Axes CNC Machining," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 36, 9, 813-819, 2019.

[10]. Michael Bartoň, Michal Bizzarri, Florian Rist, Oleksii Sliusarenko, Helmut Pottmann, "Geometry and tool motion planning for curvature adapted CNC machining," *ACM Transactions on Graphics*, 2021.

[11]. Cica Dj., Zeljkovic M., Sredanovic B., Tesic S., "Optimization of machining parameters with minimum surface roughness for three-axis milling of sculptured parts," *Journal of production*, 20 (2), 2017.

[12]. J. Ribeiro, H. Lopes, L. Queijo, D. Figueiredo, "Optimization of cutting parameters to minimize the surface roughness in the end milling process using the Taguchi method," *Period. Polytechnic. Mech. Eng.*, 61, 1, 30 - 35, 2017.

[13]. Kanchana J, Prasath V, Krishnaraj V, Geetha Priyadharshini B, "Multi response optimization of process parameters using grey relational analysis for milling of hardened Custom 465 steel," *Procedia Manufacturing*, 30, 451-458, 2019.

[14]. Milenko Sekuli, Vlastimir Peji, Marin Gostimirovi, Zoran Jurkovi, "Multi-Response optimization of ball-end milling parameters using the Taguchi-based grey relational analysis," *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, 20, 1, 33-36, 2016.

[15]. Ranjit K. Roy, *A primer on the taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 2010.

[16]. <https://www.minitab.com/en-us/products/minitab/>

AUTHOR INFORMATION

Bui Ngoc Tuyen

Hanoi University of Science and Technology, Vietnam