

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ CẮT ĐẾN LỰC CẮT VÀ BIẾN DẠNG KHI PHAY CHI TIẾT THÀNH MỎNG VẬT LIỆU HỢP KIM NHÔM A6061 TRÊN TRUNG TÂM GIA CÔNG CNC 5 TRỤC

STUDY ON THE EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS ON CUTTING FORCE AND DEFORMATION OF THIN - WALLED PART A6061 ALUMINUM ALLOY WHEN MILLING ON 5 AXIS CNC MACHINING CENTER

Nguyễn Duy Khánh, Nguyễn Văn Quảng,
Phạm Thị Thiều Thoa, Hoàng Tiến Dũng*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày khảo sát quá trình phay chi tiết thành mỏng vật liệu hợp kim nhôm A6061 bằng dao phay ngón liền khối trên trung tâm gia công CNC 5 trục nhằm đánh giá ảnh hưởng của ba thông số chế độ cắt (vận tốc cắt (V_c), lượng ăn dao răng (f_z), chiều sâu cắt hướng kính (a_p)) đến lực cắt (F) và biến dạng của chi tiết (d_p). Sử dụng phương pháp Taguchi và phương pháp phân tích phương sai (ANOVA), nghiên cứu đã xác định được yếu tố đầu vào ảnh hưởng lớn nhất đến lực cắt và biến dạng là lượng ăn dao răng với mức độ ảnh hưởng tương ứng là 77,72% và 82,81%. Phương trình toán học hồi quy ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đến lực cắt và biến dạng được xây dựng với giá trị R^2 tương ứng 98,03% và 96,06%.

Từ khóa: Chế độ cắt, chi tiết thành mỏng, lực cắt, biến dạng, vật liệu hợp kim nhôm A6061.

ABSTRACT

This paper presents investigated an aluminum alloy A6061 thin - walled milling process, in which solid end-mill and 5 - axis CNC machining center are used, to evaluate the effect of cutting parameter (cutting velocity (V_c), feed rate (f_z), radial deep of cut (a_p)) cutting force (F) and workpiece's deformation (d_p). By applying Taguchi method and analysis of variance analysis (ANOVA), the study has determined that input factor that has the greatest impact on cutting force and deformation is the feed rate with the corresponding effect level of 77.72% and 82.81% respectively. The regression mathematical equation for the effect of the shear parameters on the shear force and strain is built with R^2 values of 98.03% and 96.06% respectively.

Keywords: Cutting parameters, thin-walled components, surface roughness, deformation, A6061 aluminium alloy.

Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: tiendung@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 09/3/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/4/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/8/2021

1. GIỚI THIỆU

Trong ngành công nghiệp hàng không, các chi tiết cấu trúc thành mỏng là sử dụng rộng rãi, vì chúng có trọng lượng, chất lượng lắp ráp cao và cấu trúc cao hiệu quả [11]. Độ chính xác của chi tiết cơ khí được coi là một trong những yếu tố quan trọng nhất khi đánh giá chất lượng [5]. Tuy nhiên, do độ cứng thấp, các chi tiết có thành mỏng dễ bị biến dạng trong quá trình cắt, vấn đề này làm cho độ chính xác trở nên khó kiểm soát dẫn đến các sai số về hình dáng và kích thước chi tiết mỏng.

Đã có những công trình quan trọng được thực hiện trong việc dự đoán sự biến dạng của chi tiết thành mỏng. Hầu hết các học giả cho rằng biến dạng đàn hồi do lực cắt gây ra là yếu tố chính của độ võng cục bộ [4]. Các nghiên cứu này đã thiết lập mô hình lực cắt và sử dụng công nghệ phần tử hữu hạn để mô phỏng quá trình cắt của các chi tiết có thành mỏng và để dự đoán quy luật biến dạng cắt. Budak và Altintas đã coi dụng cụ cắt như là một chi tiết biến dạng đàn hồi. Họ đã khảo sát lỗi của quá trình phay biến dạng khi thay đổi lực cắt [2]. Svetan và cộng sự đã nghiên cứu mô hình lực và độ võng trong quá trình phay của các chi tiết phức tạp có độ cứng thấp [7]. Các khảo sát được thực hiện bởi Nieslony và nhóm nghiên cứu [6] cho thấy rằng để đạt được cao chất lượng gia công, mối quan hệ giữa độ cứng vững cục bộ và lực cắt khi phay phải được xử lý đúng cách. Một số nghiên cứu khác tập trung vào các phương pháp nghiên cứu khác nhau để phân tích mối quan hệ giữa biến dạng và ứng suất dư, đặc biệt là phương pháp nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng trên máy tính. Wei và Wang [12] đã thiết lập một mô hình phần tử hữu hạn của ứng suất dư ban đầu để phân tích độ võng tương ứng bằng cách gia công các chi tiết thành mỏng trong hàng không vũ trụ. Như vậy, có thể thấy các nghiên cứu trên đều đi đến một kết luận lực cắt trong quá trình phay là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến biến dạng trong gia công chi tiết thành mỏng.

Như đã phân tích, lực cắt là yếu tố tác động chính đến biến dạng hay độ võng của chi tiết thành mỏng trong quá trình phay và phụ thuộc và nhiều yếu tố tác động như: thông số chế độ cắt, rung động, biến dạng của chi tiết và dụng cụ cắt do tác động nhiệt, độ chính xác của dụng cụ cắt, độ cứng vững của hệ thống công nghệ [8]. Trong gia công phay biến dạng các thông số của dao ảnh hưởng đến lực cắt, rung động trong quá trình gia công như góc xoắn vì ảnh hưởng bởi khả năng thoát phoi và phân bố lực trên toàn bộ lưỡi cắt của dao [1, 3]. Các phương pháp đã được đưa ra thường là cắt thành nhiều lớp có chiều sâu cắt mỏng nhằm giảm thiểu tối đa tác động của lực cắt tới biến dạng và độ cứng vững của chi tiết trong quá trình cắt gọt, các phương pháp này sẽ làm tăng hiệu quả về chất lượng bề mặt và thời gian [9, 10, 13] trong một vài trường hợp cụ thể. Khi phân tích dự đoán được lực cắt và các yếu tố thông số đầu ra yêu cầu.

Trong bài báo này, nhóm tác giả tập trung nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời thông số chế độ cắt đến lực cắt và biến dạng khi phay chi tiết thành mỏng vật liệu hợp kim nhôm A6061. Mục đích của nghiên cứu này nhằm xây dựng mô hình toán học hồi quy giữa các thành phần lực cắt (F), biến dạng chi tiết (d_p) và ba thông số: tốc độ cắt (V_c), lượng tiến dao răng (f_z), chiều sâu cắt theo phương hướng kính (a_p) của chế độ cắt khi phay chi tiết thành mỏng hợp kim nhôm A6061. Nghiên cứu này hướng tới việc đánh giá tác động đến các thông số đầu ra từ các yếu tố đầu vào bằng cách áp dụng phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) được tích hợp trên phần mềm ứng dụng thống kê Minitab 19, đồng thời tiến hành xây dựng mô hình toán học hồi quy và dự đoán lực cắt và biến dạng của chi tiết thành mỏng trong quá trình gia công.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

2.1.1. Phôi, vật liệu và máy gia công

Phôi: Vật liệu gia công hợp kim nhôm A6061 (hình 1) có kích thước LxWxH=100x50x4 (mm). Thành phần hóa học của hợp kim nhôm A6061 trong bảng 1.



Hình 1. Mẫu thí nghiệm hợp kim nhôm A6061

Bảng 1. Thành phần hóa học của hợp kim nhôm A6061 (%)

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|-----------|-----|------------|------|-----------|-------------|------|------|---------|
| 0,4 - 0,8 | 0,7 | 0,15 - 0,4 | 0,15 | 0,8 - 1,2 | 0,04 - 0,35 | 0,25 | 0,15 | Còn lại |

Bảng 2. Đặc tính kỹ thuật của hợp kim nhôm A6061

| Đặc tính | Giá trị | Đặc tính | Giá trị |
|-------------------------------|-----------|----------------------|-----------------------|
| Nhiệt độ nóng chảy (°C) | 582 - 652 | Mô đun đàn hồi (GPa) | 68,9 |
| Hệ số dẫn nhiệt (W/m.K) | 167 | Điện trở (Ω.m) | 0,04.10 ⁻⁶ |
| Nhiệt dung riêng (J/g.°C) | 0,896 | Ứng suất uốn (MPa) | 96,5 |
| Tỷ trọng (kg/m ³) | 2,7 | Ứng suất kéo (MPa) | 276 |
| Độ cứng (HB) | 95 | Hệ thống Poisson | 0,33 |

Dụng cụ cắt (hình 2): Sử dụng dụng cụ cắt liền khối: hợp kim cứng, YG-1° E5D70100*3 của Hàn Quốc. Đường kính dao (d) = 10mm, đường kính chuôi (D) = 10mm. Số lưỡi cắt: (F) = 3, chiều dài lưỡi cắt: (L₁) = 27mm, tổng chiều dài dao: (L) = 75mm, góc xoắn của lưỡi cắt: (α) = 45°, bán kính mũi dao: R < 0,1mm.



Hình 2. Dụng cụ cắt sử dụng trong thí nghiệm

Máy gia công (hình 3): Trung tâm gia công CNC 5 trục đồng thời (DMU50) hệ điều khiển Siemens 840D: Hành trình trục X/Y/Z = 500/450/400; hành trình trục B: -5 độ đến +110 độ; hành trình trục C: 360 độ; Động cơ trục chính: tốc độ trục chính từ 20 đến 14000 (vòng/phút), công suất động cơ trục chính: 20,3kW, côn trục chính SK40 tiêu chuẩn DIN69871. Bàn làm việc: tốc độ quay trục B và C lớn nhất: 20 (vòng/phút); dài dao: số dao: 16 vị trí; chiều dài dao tối đa: 300; trọng lượng dao tối đa: 6kg; tốc độ di chuyển các trục; tốc độ gia công tối đa theo các trục X/Y/Z: 30000mm/phút; tốc độ chạy dao nhanh theo các trục X/Y/Z: 30000mm/phút.



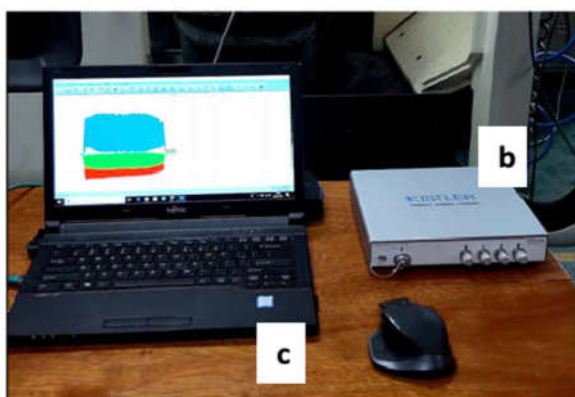
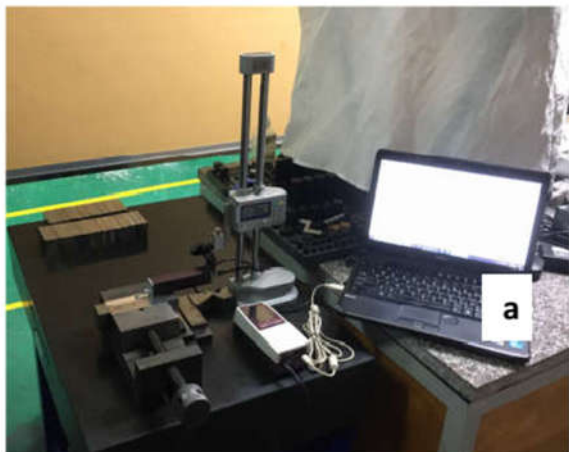
Hình 3. Trung tâm gia công CNC 5 trục DMG DMU50 và hệ thống gia công

a) Máy CNC 5 trục DMG DMU50; b) Mẫu thí nghiệm; c) Dụng cụ cắt; d) Đồ gá

2.1.2. Thiết bị đo lực cắt và biến dạng

Thiết bị đo lực: Thiết bị đo lực 3 thành phần Kistler Type 9139AA: dải đo từ -3kN đến 3kN, bộ xử lý dữ liệu kết nối

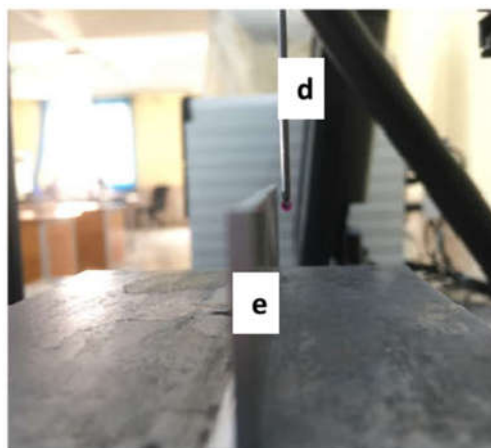
với máy tính sử dụng phần mềm DynoWare xử lý dữ liệu (hình 4).



Hình 4. Hệ thống thiết bị đo lực

a) Thiết bị đo lực; b) Hệ thống xử lý dữ liệu; c) Máy tính và giao diện phần mềm DynoWare

Thiết bị đo biến dạng: Mức độ biến dạng chi tiết được khảo sát theo chuyển vị mặt chuẩn theo phương y được đo bằng máy đo so sánh RENISHAW EQUATOR™ 300 Versatile gauge. Mỗi mẫu thí nghiệm khảo sát tại 10 điểm tương ứng với 2 giá trị z, giá trị trung bình của hai giá trị biến dạng cực đại ứng ở mỗi giá trị z sẽ được sử dụng để phân tích và tính toán cho kết quả thí nghiệm (hình 5).



Hình 5. Hệ thống thiết bị đo so sánh

a) Thiết bị đo RENISHAW EQUATOR™ 300 Versatile gauge; b) Bộ điều khiển; c) Màn hình; d) Đầu đo; e) Phôi

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Qua mô hình nghiên cứu tiến hành thí nghiệm với v , f_z , a_r . Ứng dụng phương pháp thực nghiệm Taguchi L_9 trực giao với 3 mức khác nhau để thực nghiệm phân tích dự đoán lực cắt và biến dạng khi phay biên dạng. Trên cơ sở khuyến cáo của nhà sản xuất dụng cụ cắt đối với vật liệu dụng cụ cắt hợp kim cứng YG-1 E5D70100*3 của Hàn Quốc, các thông số cắt khi gia công tinh vật liệu hợp kim nhôm A6061 trong khoảng giới hạn như sau:

- Vận tốc cắt v trên máy phay cao tốc nằm trong khoảng: $120 \div 256$ m/phút;

- Chiều sâu cắt theo phương hướng trục a_r : $0,1 \div 1,75$ mm;

- Bước tiến f_z nằm trong khoảng: $0,01 \div 0,17$ mm/răng;

Theo lý thuyết quy hoạch thực nghiệm trực giao Taguchi lựa chọn thực nghiệm với 3 mức và được xác định như bảng 3.

Bảng 3. Bảng thông số đầu vào nghiên cứu thực nghiệm

| TT | Thông số | Mức 1 | Mức 2 | Mức 3 |
|----|---|-------|-------|-------|
| | | -1 | 0 | 1 |
| 1 | Vận tốc cắt (V_c) [m/phút] | 100 | 170 | 240 |
| 2 | Lượng tiến răng (f_z) [mm/răng] | 0,02 | 0,06 | 0,1 |
| 3 | Chiều sâu cắt hướng trục (a_r) [mm] | 0,5 | 1 | 1,5 |

Bảng 4. Kết quả đo lực cắt và biến dạng

| STT | Biến mã hóa | | | Thông số thí nghiệm | | | Lực cắt F [N] | Biến dạng d_f [mm] |
|-----|-------------|-------|-------|---------------------|-----------------|------------|---------------|----------------------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | V_c [m/phút] | f_z [mm/răng] | a_r [mm] | | |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 100 | 0,02 | 0,5 | 85,794 | 0,028 |
| 2 | -1 | 0 | 0 | 100 | 0,06 | 1 | 143,16 | 0,048 |
| 3 | -1 | 1 | 1 | 100 | 0,1 | 1,5 | 157,14 | 0,056 |
| 4 | 0 | -1 | 0 | 170 | 0,02 | 1 | 111,5 | 0,033 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 170 | 0,06 | 1,5 | 140,05 | 0,056 |
| 6 | 0 | 1 | -1 | 170 | 0,1 | 0,5 | 137,72 | 0,048 |

| | | | | | | | | |
|---|---|----|----|-----|------|-----|--------|-------|
| 7 | 1 | -1 | 1 | 240 | 0,02 | 1,5 | 85,401 | 0,033 |
| 8 | 1 | 0 | -1 | 240 | 0,06 | 0,5 | 142,07 | 0,052 |
| 9 | 1 | 1 | 0 | 240 | 0,1 | 1 | 164,13 | 0,067 |

Trong nghiên cứu thực nghiệm, với 3 thông số đầu vào, mỗi thông số gồm có 3 mức khác nhau. Ma trận thí nghiệm phù hợp nhất là ($L_9 - 3^3$) bao gồm 9 thí nghiệm được lựa chọn để tiến hành nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của 3 thông số chế độ cắt là vận tốc cắt, lượng tiến răng, chiều sâu cắt hướng kính đến lực cắt và biến dạng của chi tiết thành mỏng khi phay. Kết quả đo lực cắt và biến dạng của chi tiết thành mỏng khi phay như trong bảng 4.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Kết quả phân tích lực cắt

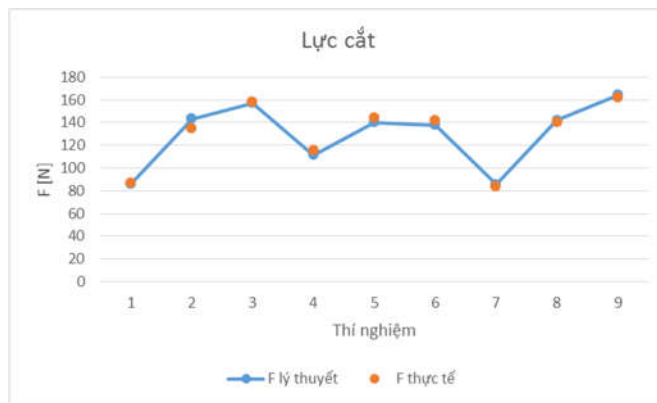
Sử dụng phương pháp ANOVA phân tích mức độ ảnh hưởng của các thông số qua bảng 5 cho lượng tiến dao f_z ảnh hưởng lớn nhất đến lực cắt khi gia công (77,72%), ảnh hưởng của tác động chéo yếu tố tốc độ cắt (V_c) và chiều sâu cắt hướng kính (a_r) chiếm 15,26%, ảnh hưởng của tốc độ cắt (V_c) chiếm 0,08%, còn các thông số khác ảnh hưởng 0,125% được tính toán bằng phân tích ANOVA.

Bảng 5. Kết quả phân tích ANOVA lực cắt

| Number of obs: | 9 | R-squared: | 0,9803 | | | |
|----------------|----------------|-------------------|-------------|---------|----------|--------------------------|
| Root MSE: | 1 | Adj R-squared: | 0,9214 | | | |
| Source | Sum of squares | Degree of freedom | Mean square | F-value | Prob > F | Percent contribution (%) |
| Model | 6534,44 | 6 | 1089,07 | 16,63 | 0,58 | 98,03 |
| V_c | 199,72 | 1 | 199,72 | 3,05 | 0,223 | 0,08 |
| f_z | 89,43 | 1 | 89,43 | 1,37 | 0,363 | 77,72 |
| a_r | 832,58 | 1 | 832,58 | 12,71 | 0,07 | 0,72 |
| $V_c * f_z$ | 644,67 | 1 | 644,67 | 9,84 | 0,088 | 1,52 |
| $V_c * a_r$ | 1074,90 | 1 | 1074,90 | 16,41 | 0,056 | 15,26 |
| $f_z * a_r$ | 182,90 | 1 | 182,90 | 2,79 | 0,237 | 2,74 |
| Error | 130,98 | 2 | 65,49 | | | 1,97 |
| Total | 6665,41 | 8 | | | | 100,000 |

Phương trình hồi quy ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đến lực cắt trong quá trình gia công có mức độ ảnh hưởng của từng thông số riêng lẻ và sự ảnh hưởng lẫn nhau, thông số đầu vào tới lực cắt được đánh giá bằng phân tích ANOVA trong bảng 5. So sánh kết quả đo được từ thực nghiệm và lực cắt đo trong quá trình thực nghiệm được mô tả ở hình 6. Qua hình mô tả cho thấy kết quả dự đoán rất gần với kết quả đo được. Giá trị R^2 của phương trình hồi quy của số liệu lực cắt là 98,03%. Vì vậy, mô hình hồi quy toán học này là mô hình hồi quy phù hợp nhất với 3 thông số đầu vào (vận tốc cắt, chiều sâu cắt theo hướng kính, lượng ăn dao) và thông số đầu ra là giá trị lực cắt.

$$\begin{cases} F = -7,2 + 0,287V_c - 446f_z + 214,2a_r \\ + 8,40V_c * f_z - 0,867V_c * a_r - 626f_z * a_r \\ R^2 = 98,03\%, \quad R^2_{Ajd} = 92,14\% \end{cases} \quad (1)$$



Hình 6. Kết quả đo từ thực nghiệm và dự đoán lực cắt F

3.2. Kết quả phân tích biến dạng

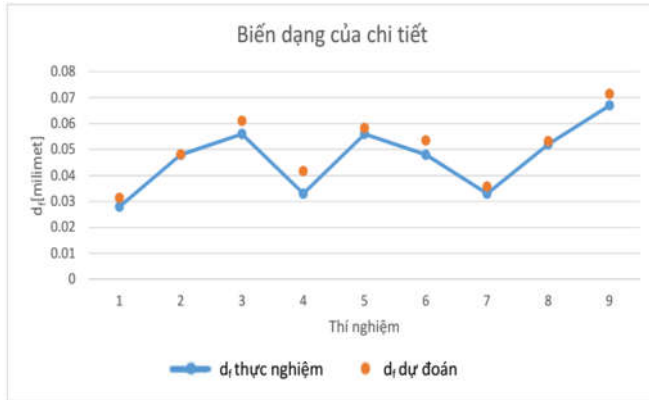
Sử dụng phương pháp ANOVA phân tích mức độ ảnh hưởng của các thông số, thông qua bảng 6 cho thấy lượng tiến dao răng (f_z) ảnh hưởng lớn nhất đến biến dạng của chi tiết (82,81%), chiều sâu cắt hướng kính (a_r): 5,78%, tốc độ cắt (V_c) chiếm 0,38%, giá trị cụ thể được thể hiện bằng phân tích ANOVA (bảng 6).

Bảng 6. Kết quả phân tích ANOVA về mức độ biến dạng của chi tiết

| Number of obs: | 9 | R-squared: | 0,9609 | | | |
|----------------|----------------|-------------------|-------------|---------|----------|--------------------------|
| Root MSE: | 0,00512 | Adj R-squared: | 0,8437 | | | |
| Source | Sum of squares | Degree of freedom | Mean square | F-value | Prob > F | Percent contribution (%) |
| Model | 0,001241 | 8 | 0,90186105 | 16,22 | 0,0000 | |
| V_c | 0,000072 | 2 | 0,000036 | 0,44 | 752,74 | 5,38 |
| f_z | 0,001110 | 2 | 0,000555 | 752,74 | 0,001 | 82,81 |
| a_r | 0,0000775 | 2 | 0,000039 | 0,86 | 0,005 | 5,78 |
| Error | 0,000956 | 0 | | | | 6,03 |
| Total | 0,721489 | 8 | 0,090186105 | | | 100,000 |

Phương trình toán học hồi quy ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đến biến dạng khi phay có mức độ ảnh hưởng của từng thông số riêng lẻ và sự ảnh hưởng lẫn nhau của thông số đầu vào tới biến dạng được đánh giá dựa vào phân tích ANOVA như trong bảng 6. So sánh kết quả đo được từ thực nghiệm và giá trị dự đoán mức độ biến dạng được mô tả hình 7. Qua hình mô tả cho thấy kết quả dự đoán rất gần với kết quả đo được. Giá trị R^2 của phương trình hồi quy của biến dạng đạt được 96,09%. Vì vậy, mô hình hồi quy toán học này là mô hình hồi quy phù hợp nhất với 3 thông số đầu vào (vận tốc cắt, chiều sâu cắt theo phương dọc trục, lượng chạy dao) và thông số đầu ra là biến dạng của chi tiết.

$$\begin{cases} d_f = 0,028 + 0,000055V_c - 0,279f_z + 0,0611a_r \\ + 0,00352V_c * f_z - 0,000233V_c * a_r \\ - 0,100f * a_r \\ R^2 = 96,09\%, \quad R^2_{Ajd} = 84,37\% \end{cases} \quad (2)$$



Hình 7. Kết quả đo từ thực nghiệm và dự đoán lực cắt

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày quá trình tiến hành thực nghiệm và phân tích ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt (V_c , f_z , a_r) khi phay hợp kim nhôm A6061. Nghiên cứu này ứng dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi để thiết kế và đánh giá thí nghiệm, ngoài ra phần mềm Minitab 19 được sử dụng để xây dựng mô hình toán học hồi quy thực nghiệm giữa thông số đầu vào và thông số đầu ra là lực cắt và biến dạng của chi tiết trong khi gia công. Kết quả cho thấy lực cắt chịu tác động lớn nhất từ lượng ăn dao răng f_z (77,72%), sau đó là tác động chéo giữa tốc độ cắt V_c và chiều sâu cắt hướng kính a_r (15,26%). Mức độ biến dạng khi gia công d_f tương ứng với các mức độ ảnh hưởng của lượng tiến dao răng f_z (82,81%), chiều sâu cắt hướng trục a_r (5,78%), tốc độ cắt V_c (5,38%). Dựa trên các phân tích trong bài nghiên cứu này, các phương án gia công và chế độ gia công hợp lý có thể được ứng dụng trong công nghiệp gia công các sản phẩm từ các vật liệu tương tự.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hoang Tien Dung, Pham Thi Thieu Thoa, Nguyen Tuan Linh, Quan Ngoc Cu, 2020. *Application of the Taguchi method to investigate the effects cutting parameters and helix angle on cutting force when milling aluminum alloy Al6061 by a solid end mill tool*. Journal of Science & Technology, Hanoi University Of Industry, Vol. 56, No. 1, 21-26.
- [2]. Budak E., Altintas Y., 1995. *Modeling and avoidance of static form errors in peripheral milling of plates*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 35, 459-476.
- [3]. He Ning, Wang Zhigang, Jiang Chengyu, Zang Bing, 2003. *Finite element method analysis and control stratagem for machining deformation of thin - walled components*. Journal of Materials Processing Technology 139, 332-336.
- [4]. Liu Gang, 2009. *Study on deformation of titanium thin - walled part in milling process*. Journal of Materials Processing Technology 209, 2788-2793.
- [5]. M. Wan, W.H. Zhang, G.H Qin, Z.P Wang, 2008. *Strategies for error prediction and error control in peripheral milling of thin-walled wall*. Int. J. of Mach. Tools Manuf. 48, 1366-1374.
- [6]. Nieslony P., Krolczyk G.M., Wojciechowski S., Chudy R., Zak K., Maruda R.W., 2018. *Surface quality and topographic inspection of variable compliance part after precise turning*. Appl Surf Sci 434: 91-101.

[7]. Svetan R., Evan G., Stan N., 2003. *Force and deflection modeling in milling of low-rigidity complex parts*. Journal of Materials Processing Technology 143-144, 796-801.

[8]. Swan M.S., 2012. *Incorporation of a general strain-to-failure fracture criterion into a stress based plasticity model through a time to failure by*. Thesis Mech Eng - Univ Utah, USA. doi: 10.1016/0013-7944(85)90052-9

[9]. Routara B. et al., 2009. *Roughness modeling and optimization in CNC end milling using response surface method: effect of workpiece material variation*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 40 (11-12), pp. 1166-1180.

[10]. J.S. Tsai, C.L Liao, 1999. *Finite - element modelling of static surface errors in the peripheral milling of thin - walled workpieces*. J. Mater. Process. Technol. 94, 235-246.

[11]. Wang H., Zhou M.X., Zheng W.Z., Shi Z.B., Li H.W., 2017. *3D machining allowance analysis method for the large thin-walled aerospace component*. Int J Precis Eng Manuf 18(3): 399-406.

[12]. Wei Y., Wang X.W., 2007. *Computer simulation and experimental study of machining deflection due to original residual stress of aerospace thin-walled parts*. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 33, 260-265

[13]. Zeng S.S., Wan X.J., Li W.L., Yin Z.P., Xiong Y.L., 2012. *A novel approach to fixture design on suppressing machining vibration of flexible workpiece*. Int J Mach Tools Manuf 58(7):29-43.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Duy Khanh, Nguyen Van Quang, Pham Thi Thieu Thoa, Hoang Tien Dung

Hanoi University Of Industry