

# DỰ ĐOÁN ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ CẮT VÀ GÓC XOẮN DAO PHAY NGÓN LIỀN KHỐI ĐẾN LỰC CẮT KHI PHAY

PREDICTION OF EFFECT CUTTING PARAMETERS AND HELIX ANGLE  
OF SOLID END MILL TO CUTTING FORCE IN MILLING

Hoàng Tiến Dũng<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Văn Thiện<sup>1</sup>, Đỗ Đức Trung<sup>1</sup>,  
Trần Quốc Hùng<sup>1</sup>, Phạm Thị Thiệu Thoa<sup>1</sup>, Phạm Văn Trinh<sup>1</sup>

## TÓM TẮT

Bài báo này đề cập ảnh hưởng của chế độ cắt và góc xoắn của dao đến lực cắt trong quá trình phay sử dụng dao phay ngón liền khối gia công biên dạng. Nội dung bài báo trình bày nghiên cứu, thực nghiệm và xử lý số liệu để đưa ra quan hệ toán học ảnh hưởng của chế độ cắt và góc xoắn đến lực cắt trong quá trình gia công và ứng dụng phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) phân tích mối quan hệ phụ thuộc lực cắt với chế độ cắt và góc dao trong quá trình phay bằng dao phay ngón. Qua mô hình toán học có thể dự đoán được lực cắt xảy ra trong quá trình gia công. Và phân tích mức độ ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt và góc xoắn đến lực cắt trong quá trình gia công. Nghiên cứu này cũng là cơ sở nghiên cứu các mô hình khác trong quá trình gia công phay. Trên cơ sở phương trình mô hình hóa ảnh hưởng đó giúp nhà thiết kế và chế tạo dao phay ngón liền khối.

**Từ khóa:** chế độ cắt, góc dao, lực cắt, phay, dao phay ngón liền khối.

## ABSTRACT

This article refers to the influence of cutting parameters and helix angle to cutting force when milling by solid end mill. The contents of the article presents research methods by experiment and data processing to give the relationship between cutting parameters and helix angle with cutting force and application ANOVAR (**Analysis Of Variance**) analyses relationships dependence of cutting force with cutting parameters and helix angle in milling by solid end-mill tool. Through the mathematical model that can predict the cutting force happened in the machining process. And analyze the impact of cutting parameters and helix angle to the cutting force of the machining process. This study is the basis of other research models in the milling. On the basis of this modeling to design and manufacture end mill tool.

**Keywords:** Cutting parameters, cutting force, helix angle, milling, solid end mill.

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: tiendunghai@gmail.com

Ngày nhận bài: 12/01/2018

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 04/04/2018

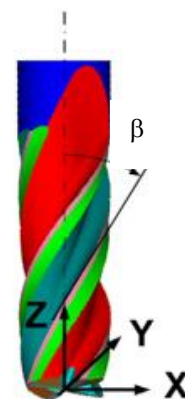
Ngày chấp nhận đăng: 24/05/2018

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong quá trình gia công cắt gọt có rất nhiều hiện tượng xảy ra, ảnh hưởng đến chất lượng gia công và hiệu

quả kinh tế. Hiện tượng đó sinh ra đại lượng trung gian trong quá trình gia công: lực cắt, rung động, nhiệt cắt, mòn dao... Đối với các doanh nghiệp chế tạo chi tiết vấn đề liên quan đến hiệu quả kinh tế là cần thiết và cấp thiết phải nghiên cứu. Để đáp ứng được điều kiện phát triển và nhu cầu của các công ty chế tạo chi tiết máy, các công ty chế tạo dụng cụ cắt nghiên cứu thiết kế dụng cụ cắt để đảm bảo quá trình gia công tăng năng suất và tăng tuổi bền của dụng cụ cắt.

Công nghệ chế tạo dụng cụ cắt đóng vai trò quan trọng vì không có dụng cụ cắt tốt về chất lượng, nhiều về số lượng thì không thể chế tạo được những máy móc với chất lượng cao, không thể tăng năng suất lao động, hạ giá thành sản phẩm và cải thiện điều kiện làm việc [1]. Thông số dao phay ngón bao gồm thông số hình học lưỡi cắt, góc trước, góc sau, bán kính mũi dao và góc nghiêng. Góc nghiêng tương ứng với góc xoắn của dao phay ngón như trong hình 1.

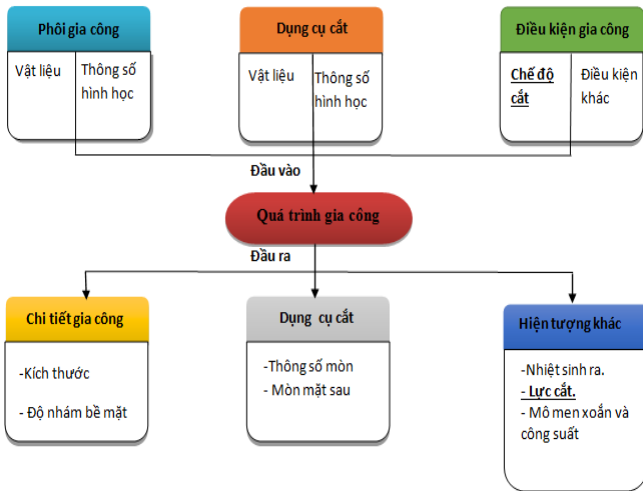


Hình 1. Góc xoắn dao phay ngón liền khối

Ngoài ra trong quá trình gia công các thông số chế độ cắt ảnh hưởng đến chất lượng, năng suất và giá thành sản phẩm.

Quá trình gia công và mức độ phức tạp của công nghệ ngày nay đòi hỏi hệ thống điều khiển thực hiện xử lý chính xác bằng các phương pháp khác nhau nhằm mục đích tăng chất lượng và hiệu quả. Nghiên cứu này xây dựng hàm toán học độ tin cậy cao và các hiện tượng xuất hiện trong quá

trình gia công tốt nhất có thể. Kỹ thuật gia công chính xác không chỉ dựa trên cơ sở kinh nghiệm và sự tinh thông mà còn phải hiểu nguyên lý gia công và mối quan hệ toán học các thông số ảnh hưởng trong quá trình gia công. Quá trình gia công được xác định bởi mối quan hệ của các giá trị đầu vào và hiệu quả đo được qua giá trị đầu ra. Hình 2 mô hình quá trình gia công được sử dụng nghiên cứu trong bài báo này với thông số đầu vào và đánh giá đầu ra. Mục đích của nghiên cứu này là tìm mô hình toán học liên quan đến các thành phần lực cắt với bốn thông số chế độ cắt: tốc độ cắt ( $v$ ), lượng chạy dao ( $f$ ), chiều sâu cắt theo phương hướng kính ( $a_p$ ) và góc xoắn của dao khi gia công biên dạng bằng dao phay ngón.



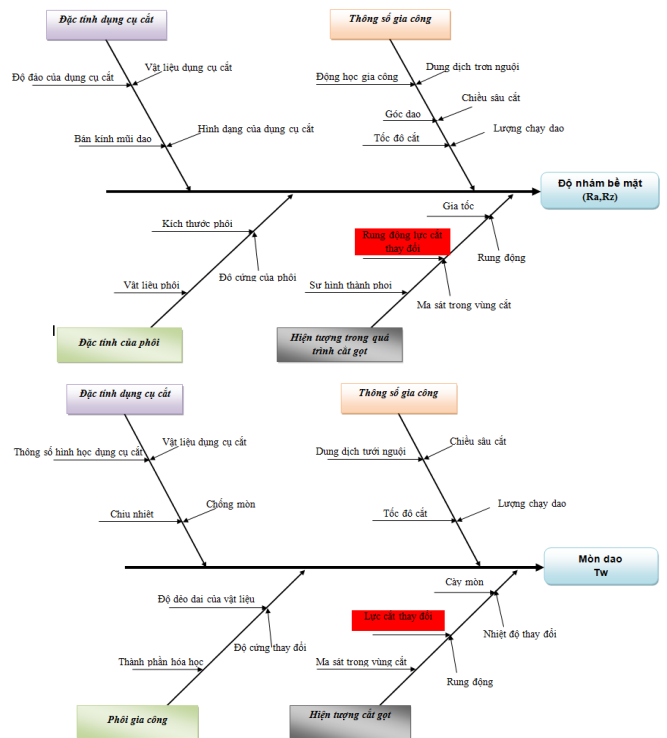
Hình 2. Sơ đồ mô hình nghiên cứu

Nghiên cứu này tiếp cận với phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) và các phần mềm ứng dụng thống kê trong quy hoạch thực nghiệm để xây dựng mô hình toán học mối quan hệ thông số chế độ cắt và góc xoắn của dao phay ngón đến độ lực cắt trong quá trình gia công.

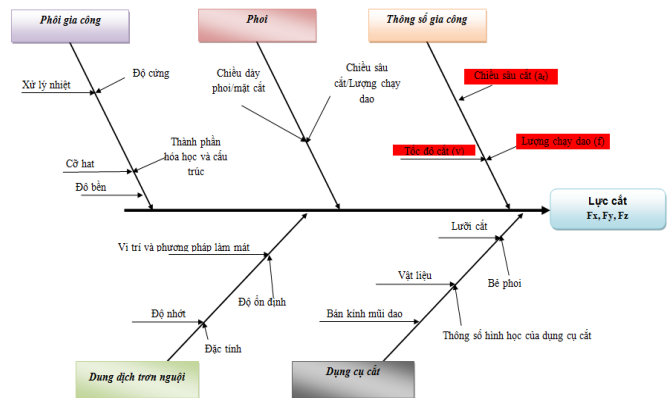
## 2. PHÂN TÍCH HIỆN TƯỢNG CƠ BẢN TRONG QUÁ TRÌNH GIA CÔNG

Trong quá trình gia công có nhiều hiện tượng xảy ra ảnh hưởng tới chất lượng và năng suất gia công. Mô hình hóa hiện tượng trong quá trình gia công, thông số cắt cần thiết để cung cấp thông tin quan trọng trong lập quy trình công nghệ gia công chi tiết và tối ưu hóa quá trình gia công. Cơ chế hình thành bề mặt trong quá trình động lực học phay được xác định là lực cắt. Kiểm soát sự thay đổi quá trình gia công là lực cắt, nó phản ánh rõ nét nhất gia công không bình thường như vỡ dụng cụ cắt và rung động và ảnh hưởng tới chất lượng bề mặt gia công. Qua đó phân tích mối liên hệ giữa lực cắt thay đổi với độ nhám, lượng mòn dao (hình 3) [10, 11].

Trong quá trình gia công sử dụng dao phay ngón lực cắt thay đổi liên tục trong suốt quá trình gia công. Các thành phần lực cắt tức thời được tính toán dựa trên sự thay đổi của diện tích cắt. Trong quá trình gia công có rất nhiều thông số ảnh hưởng tới lực cắt được trình biểu đồ xương cá (hình 4) [10, 11].



Hình 3. Biểu đồ xương cá ảnh hưởng thông số tới độ nhám bề mặt và mòn dao



Hình 4. Biểu đồ xương cá yếu tố ảnh hưởng lực cắt trong quá trình gia công

Lực cắt là một trong thông số vật lý đánh giá quá trình gia công như hiện tượng mòn vỡ dụng cụ cắt, rung động của máy, độ chính xác gia công và chất lượng bề mặt. Lực cắt là một trong thông số trung gia trong quá trình gia công để thực hiện tối ưu hóa thích nghi.

Đã có nhiều nhà nghiên cứu đã nghiên cứu, khảo sát các yếu tố ảnh hưởng tới lực cắt và nhám bề mặt trong quá trình gia công.

Trong bài báo này, nhóm tác giả giới hạn nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ cắt: Tốc độ cắt ( $v$ ), lượng chạy dao ( $f$ ), chiều sâu theo phương hướng kính ( $a_p$ ) và góc xoắn tới lực cắt.

## 3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT LỰC CẮT CỦA QUÁ TRÌNH GIA CÔNG PHAY BẰNG DAO PHAY NGÓN LIỀN KHỐI

### 3.1. Mô hình lực cắt

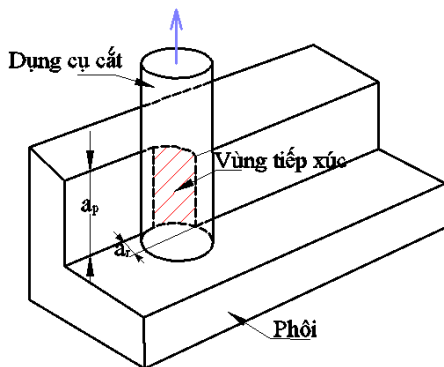
Quá trình gia công phay là phương pháp phổ biến nhất trong công nghiệp gia công. Có khả năng công nghệ gia

công rộng và gia công được nhiều dạng bề mặt khác nhau như: phay mặt phẳng, phay rãnh, phay bậc, phay định hình...

Có nhiều thông số ảnh hưởng đến lực cắt tác dụng lên lưỡi cắt của dụng cụ cắt. Các thông số tác động làm thay đổi lực cắt mà không dự đoán được trước dẫn đến kích thước gia công, chất lượng gia công không đạt yêu cầu trong quá trình gia công.

Lực cắt là một trong các thông số đầu ra cần được kiểm soát và dự báo để điều chỉnh các thông số tối ưu đạt được chất lượng và năng suất, đặc biệt trong điều khiển tối ưu hóa thích nghi.

Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng chế độ cắt ( $v$ ,  $f$ ,  $a$ ) đến lực cắt khi gia công phay cao tốc bằng dao phay ngón liền khối.

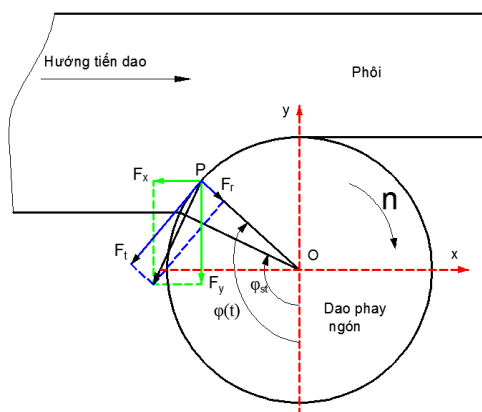


Hình 5. Vùng tiếp xúc dụng cụ cắt và phôi thuận

Lý thuyết vùng tiếp xúc trong quá trình gia công bằng dao phay ngón (hình 5)[9].

Quá trình gia công phay bằng dao phay ngón là quá trình nhiều điểm tham gia cắt tức thời, lưỡi cắt và phôi tiếp xúc không liên tục, chiều dày phôi thay đổi trong quá trình gia công.

### 3.2. Phân tích mô hình lực cắt trong quá trình phay



Hình 6. Mô hình phân tích lực dao phay ngón tiến hành phay thuận

Trong quá trình gia công phay bằng dao phay ngón quá trình tiếp xúc lưỡi cắt và phôi tức thời, không liên tục khi trục chính quay. Như hình 6 quá trình gia công phay thuận lực cắt thay đổi theo dịch chuyển của bàn máy từ giá trị lớn nhất đến giá trị 0. Chiều dày của phôi lớn nhất xảy ra tại điểm tiếp xúc ban đầu của lưỡi cắt và phôi. Do đó, sự thay

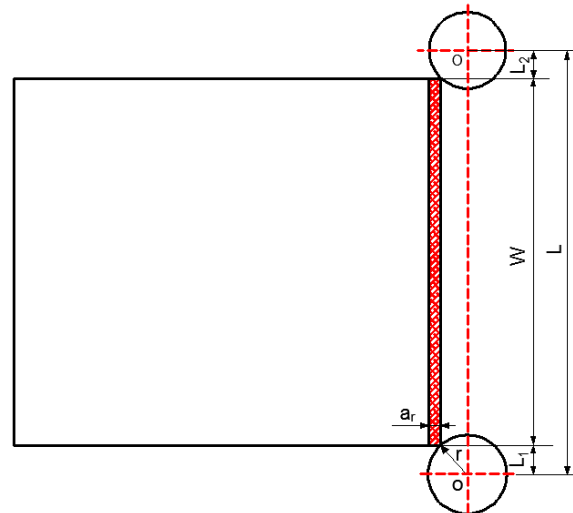
đổi chiều dày phôi trong quá trình gia công dẫn đến sự thay đổi về lực cắt tác động lên lưỡi cắt của dụng cụ cắt khi vào cắt và ra khỏi vùng cắt của lưỡi cắt.

Trong suốt quá trình bóc tách vật liệu dụng cụ cắt chịu tác động bởi thành phần lực cắt tức thời theo phương tiếp tuyến  $F_t$  theo phương pháp tuyến  $F_r$ , theo phương dọc trục  $F_a$  (hệ thống lực cắt dao phay ngón khi phay biên dạng). Xét tại một điểm tiếp xúc giữa dụng cụ cắt và phôi có ba thành phần lực tác dụng lên dụng cụ cắt (Lực cắt theo phương  $x$ :  $F_x$  lực cắt theo phương  $y$ :  $F_y$ , theo phương  $z$ :  $F_z$ ) trong hệ tọa độ Đề-các OXYZ được xác định như sau:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} F_t \\ F_r \\ F_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & -\cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$



Hình 7. Mô hình đường cắt thực nghiệm phay thuận

Góc vào của lưỡi cắt trong quá trình phay thuận xác định như sau:

$$\varphi_{st} = 90^\circ + \arcsin[(r - a_r)/r] \quad (3)$$

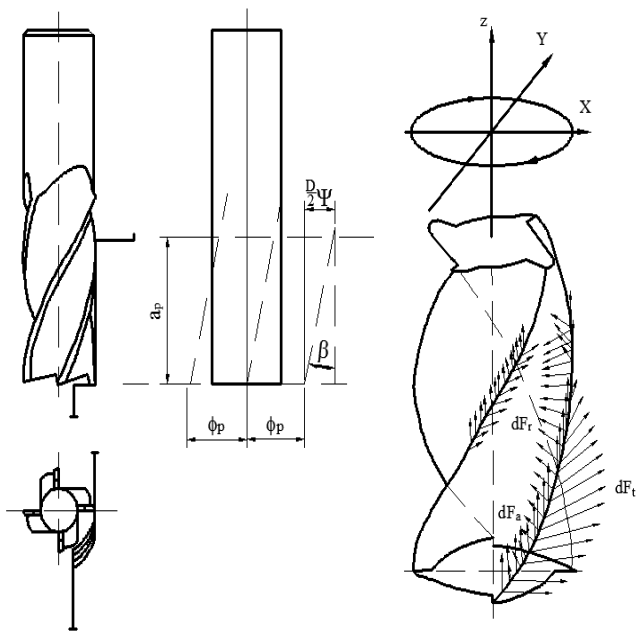
Góc thoát ra của lưỡi cắt có giá trị xấp xỉ bằng  $\varphi_{ex} = 180^\circ$  và chiều dày của phôi tại điểm này bằng 0. Cần chú ý khi lưỡi cắt tiếp xúc với phôi để thực hiện gia công có ba thành phần lực  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  tồn tại trong quá trình gia công. Ba thành phần lực khác không phương trình 1 viết như sau:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} F_t \\ F_r \\ F_a \end{bmatrix} \text{ khi } \varphi_{st} < \varphi < \varphi_{ex} \quad (4)$$

Như trong quá trình phay thuận dao phay ngón bắt đầu cắt được xác định như sau:

$$L_1 = \sqrt{r^2 - (r - a_r)^2} \quad (5)$$

3.3. Phân tích lực trên lưỡi cắt của dao phay ngón



Hình 8. Hình học dao phay ngón rãnh xoắn [7]

Trong quá trình gia công bằng dao phay ngón liền khối tải trọng tác động chu kỳ gây ra ứng suất theo chu kỳ cơ học và nhiệt tác dụng lên dao cắt, dẫn đến tuổi thọ của dao cắt giảm. Các loại dao phay ngón lưỡi cắt xoắn được sử dụng để làm giảm sự thay đổi đột ngột các thành phần rung động của lực cắt và được sử dụng khi chiều sâu cắt lớn, nhưng chiều rộng cắt nhỏ. Chức năng chính của chúng là phay đường bao để đạt được chất lượng bề mặt đường bao. Một dao phay ngón điển hình với rãnh xoắn được thể hiện trong hình 8. Sự xoắn của răng cắt làm tăng dần lực dọc theo đường rãnh xoắn của dao phay ngón [8]. Nếu góc xoắn trên dao phay là  $\beta$ , một điểm trên các cạnh của lưỡi cắt sẽ bị trễ so với điểm cuối của dao phay. Góc trễ ( $\psi$ ) ở chiều sâu cắt theo phương dọc trục (z) được xác định như hình 8.

$$\tan \beta = \frac{D\psi}{2z} \tag{6}$$

$$\psi = \frac{2z \tan \beta}{D} \tag{7}$$

Khi điểm dưới răng cắt của dao phay ngón có góc ăn dao  $\phi$ , một điểm trên răng cắt để cắt chiều sâu z(mm) khi đó góc ăn dao ( $\phi - \psi$ ). Chắc chắn rằng, chiều dày của phoi bị loại bỏ dọc theo rãnh xoắn cũng sẽ khác nhau ở mỗi điểm.

4. KHẢO SÁT LỰC CẮT KHI PHAY BẰNG DAO PHAY NGÓN LIỀN KHỐI

4.1. Điều kiện khảo sát

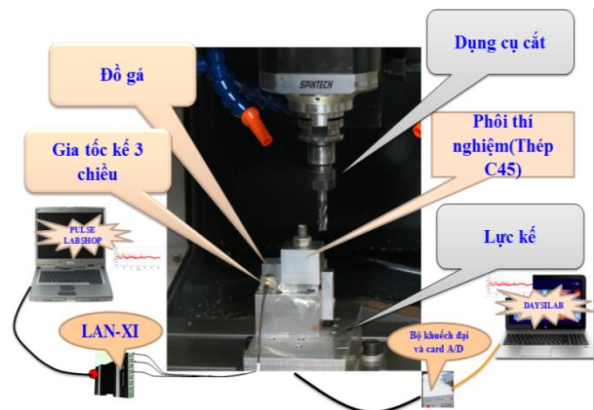
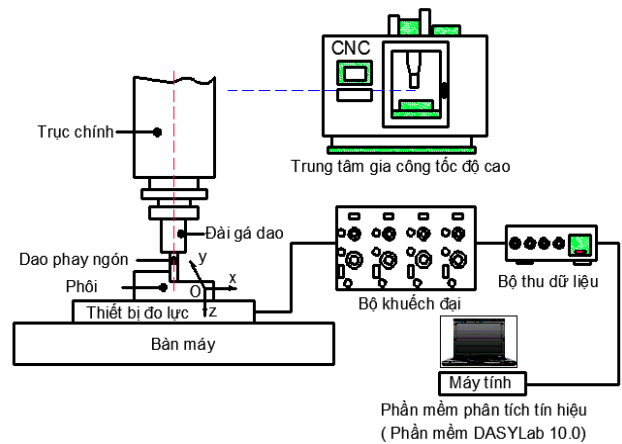
Máy phay CNC: HS Super TC500, tốc độ quay trục chính: 100÷30000(v/p), tốc độ dịch chuyển của bàn máy cắt gọt: 1÷30000(mm/p), tốc độ chày không lớn nhất: 48000(mm/p). Hành trình dịch chuyển của bàn máy: XxYxZ=500x400x300(mm).

Dụng cụ cắt: Sử dụng dụng cụ cắt dao phay ngón khối gia công biên dạng, vật liệu hợp kim cứng KF440. Đường kính dao (D) = đường kính chuôi = 8 mm. Số lưỡi cắt: 4. Chiều dài đoạn làm việc: 26,5 mm. Tổng chiều dài: 82 mm. Góc nghiêng Helix: 15, 30, 45 độ.

Chi tiết gia công: Vật liệu gia công thép C45 kích thước mẫu thí nghiệm LxWxH=70x70x40(mm).

Thiết bị đo lực: Thiết bị đo lực cắt 3 thành phần của hãng Kistler - Thụy Sĩ, sử dụng cảm biến đo lực 9257B-Kistler. Dải đo lực ( $F_x=1500N, F_y=1500N, F_z=5000N$ ). Độ nhạy của cảm biến theo phương X,Y: 7,39 pC/N, phương Z: 3,72 pC/N. Thiết bị chuyển đổi tín hiệu A/D và thu thập vào máy tính sử dụng phần mềm DASylab 10.0.

4.2. Kết quả và thảo luận



Hình 9. Sơ đồ và mô hình thực nghiệm

Qua mô hình nghiên cứu (hình 9) tiến hành thí nghiệm với v, f,  $a_r$  thay đổi, chiều sâu cắt dọc trục  $a_p = 10$ (mm) không thay đổi.

Mô hình toán học lực cắt khi gia công dao phay ngón khi gia công phay cao tốc trong giới hạn của các thông số cũng như các phương pháp gia công truyền thống được miêu tả chung như sau:

$$F_x = C_1 \cdot v^{k_1} \cdot f^{l_1} \cdot a_r^{m_1} \cdot \beta^{n_1}; F_y = C_2 \cdot v^{k_2} \cdot f^{l_2} \cdot a_r^{m_2} \cdot \beta^{n_2}; F_z = C_3 \cdot v^{k_3} \cdot f^{l_3} \cdot a_r^{m_3} \cdot \beta^{n_3} \tag{8}$$

Trong đó:  $F_x, F_y, F_z$ : lực cắt tương ứng theo các phương X, Y, Z; v: tốc độ cắt (m/p), f: lượng chạy dao (mm/p),  $a_r$ :

Bảng 1. Kết quả đo lực cắt theo 3 phương X,Y,Z

Thứ tự	Biến mức mã hóa				Tốc độ cắt v, (m/min)	Lượng chạy dao f (mm/r)	Chiều sâu cắt theo phương hướng kính a <sub>r</sub> (mm)	Góc xoắn (β°)	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>
	X1	X2	X3	X4							
1	-1	-1	-1	-1	60	0,01	0,1	15	55,7	19,3	13,4
2	1	-1	-1	-1	200	0,01	0,1	15	111,5	30,7	17,5
3	-1	1	-1	-1	60	0,15	0,1	15	150,2	29,0	16,0
4	1	1	-1	-1	200	0,15	0,1	15	321,2	52,1	23,4
5	-1	-1	1	-1	60	0,01	0,5	15	97,8	33,3	19,2
6	1	-1	1	-1	200	0,01	0,5	15	182,9	39,5	21,5
7	-1	1	1	-1	60	0,15	0,5	15	227,0	41,9	19,3
8	1	1	1	-1	200	0,15	0,5	15	492,2	80,9	30,7
9	-1	-1	-1	1	60	0,01	0,1	45	43,8	16,9	14,9
10	1	-1	-1	1	200	0,01	0,1	45	85,2	25,3	20,9
11	-1	1	-1	1	60	0,15	0,1	45	113,7	24,0	18,3
12	1	1	-1	1	200	0,15	0,1	45	240,5	41,2	28,4
13	-1	-1	1	1	60	0,01	0,5	45	67,6	19,8	17,5
14	1	-1	1	1	200	0,01	0,5	45	138,1	31,9	26,6
15	-1	1	1	1	60	0,15	0,5	45	170,7	33,6	23,7
16	1	1	1	1	200	0,15	0,5	45	367,2	62,5	40,5
17	0	0	0	0	130	0,08	0,3	30	252,3	96,0	19,1
18	0	0	0	0	130	0,08	0,3	30	251,1	93,2	18,7
19	0	0	0	0	130	0,08	0,3	30	250,5	97,1	19,5

chiều sâu cắt theo phương hướng kính (mm). C<sub>1</sub>, k<sub>1</sub>, l<sub>1</sub>, m<sub>1</sub>, n<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, k<sub>2</sub>, l<sub>2</sub>, m<sub>2</sub>, n<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, k<sub>3</sub>, l<sub>3</sub>, m<sub>3</sub>, n<sub>3</sub>: hệ số được xác định trong quá trình thực nghiệm. Để xác định hằng số và số mũ của phương trình, mô hình toán học này được tuyến tính hóa bằng hàm logarit và phương trình được viết lại như sau:

$$\ln F_x = \ln C_1 + k_1 \cdot \ln v + l_1 \cdot \ln f + m_1 \cdot \ln a_r + n_1 \cdot \ln \beta \quad (9)$$

$$\ln F_y = \ln C_2 + k_2 \cdot \ln v + l_2 \cdot \ln f + m_2 \cdot \ln a_r + n_2 \cdot \ln \beta \quad (10)$$

$$\ln F_z = \ln C_3 + k_3 \cdot \ln v + l_3 \cdot \ln f + m_3 \cdot \ln a_r + n_3 \cdot \ln \beta \quad (11)$$

Và mô hình tuyến tính của phương trình có dạng như sau:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 \quad (12)$$

Bài toán trở thành xác định hàm hồi quy thực nghiệm thực hiện 11 thí nghiệm, 3 thí nghiệm tại điểm tâm được kết quả như trong bảng 1.

Ứng dụng Excel sử dụng phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) tính toán và đánh giá hàm hồi quy thực nghiệm [8]. Kết quả được trình bày trong bảng 2.

Theo phân tích phương sai significane  $F=2,97E-14 < 0,05$  phương trình hồi quy thu được tương hợp với thực tế.

Hàm hồi quy thực nghiệm như sau:

$$y = 4,5974 + 0,6068 \cdot x_1 + 0,3673 \cdot x_2 + 0,2925 \cdot x_3 - 0,252 \cdot x_4 \quad (13)$$

Hàm lực cắt theo phương X (F<sub>x</sub>) phụ thuộc vào v, f, a<sub>r</sub>, β.

$$F_x = 99,27 \cdot v^{0,6068} \cdot f^{0,3673} \cdot a_r^{0,2925} \cdot \beta^{-0,252} \quad (14)$$

Bảng 2. Tóm tắt kết quả ứng dụng phần mềm Excel bằng phương pháp ANOVA ảnh hưởng của v, f, a<sub>r</sub> đến lực cắt theo phương x (F<sub>x</sub>)

Regression Statistics					
Multiple R	0,975646				
R Square	0,971311				
Adjusted R Square	0,968829				
Standard Error	0,069576				
Observations	19				
ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	4	7,732387535	1,933097	399,3293	2,97E-14
Residual	14	0,06772028	0,004841		

Tương tự ứng dụng phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) xác định được hàm biên độ rung động theo các phương Y (F<sub>y</sub>), Z (F<sub>z</sub>) phụ thuộc vào v, f, a<sub>r</sub>, β.

$$F_y = 22,94 \cdot v^{0,46} \cdot f^{0,23} \cdot a_r^{0,27} \cdot \beta^{-0,166} \quad (15)$$

$$F_z = 5,69 \cdot v^{0,2875} \cdot f^{0,0792} \cdot a_r^{0,1395} \cdot \beta^{0,1182} \quad (16)$$

## 5. KẾT LUẬN

Qua phân tích, khảo sát ảnh hưởng thông số chế độ cắt và góc xoắn ( $v, f, a_r, \beta$ ) tới lực cắt trong quá trình phay thuận vật liệu thép C45 bằng dao phay ngón liền khối. Kết quả đo và phân tích mức độ ảnh hưởng lực cắt trong suốt quá trình phay biên dạng với chế độ cắt và góc xoắn khác nhau. Qua thực nghiệm và hàm toán học cho thấy lực cắt theo hai phương X, Y tỉ lệ nghịch với góc xoắn ( $\beta$ ), lực cắt theo phương Z tỉ lệ thuận với góc xoắn ( $\beta$ ). Bài báo này có thể sử dụng để phân tích, tính toán trong thiết kế và chế tạo dao phay ngón liền khối.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M.M.Palei, 1981. *Công nghệ chế tạo dụng cụ cắt*. NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
- [2]. Trần Văn Địch, 2006. *Công nghệ chế tạo máy*. NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
- [3]. Trần Văn Địch, 2003. *Nghiên cứu độ chính xác gia công bằng thực nghiệm*. NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
- [4]. Bành Tiến Long, 2001. *Nguyên lý gia công vật liệu*. NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
- [6]. Phạm Thị Ngọc Yến, 2009. *Cơ sở Matlab và ứng dụng*. NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
- [7]. YUSUF ALTINTAS, 2012. *Manufacturing Automation*. Cambridge University Press: 32 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473, USA.
- [8]. W.A. Kline, R.E. DeVor, and W.J. Zdeblick, 1980. *A mechanistic model for the force system in end milling with application to machining airframe structures*. In: North American Manufacturing Research Conference Proceedings, Dearborn, MI, page 297. Society of Manufacturing Engineers, Vol. XVIII.
- [9]. Wen-Hsiang Lai, 2000. *Modeling of Cutting Forces in End Milling Operations*. Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 15-22.
- [10]. B. C. Routara, A. Bandyopadhyay, P. Sahoo, 2009. *Roughness modeling and optimization in CNC end milling using response surface method: effect of workpiece material variation*. Int J Adv Manuf Technol 40:1166–1180.
- [11]. Benardos PG, Vosniakos GC, 2003. *Predicting surface roughness in machining*. Int J Mach Tools Manuf 43:833–844.