

## **Nghiên cứu xác định hệ số lực cản cắt của thép xám FC25 khi gia công bằng lưỡi phay ngón trên máy phay CNC**

**Determining the Cutting Force Coefficients of FC25 grey iron when machining by a flat-end milling on CNC milling machine**

Nguyễn Như Tùng<sup>1,\*</sup>, Hoàng Tiến Dũng<sup>1</sup>, Bùi Gia Thịnh<sup>2,3</sup>, Đỗ Anh Tuấn<sup>3</sup>, Nguyễn Quân<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Trường Đại học Hải Phòng

<sup>3</sup>Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Hưng Yên

<sup>4</sup>Trường Đại học Phạm Văn Đồng

\* Email: tungnn@hau.edu.vn

Tel: +84-437655121-321; Mobile: 0988480490

---

### **Tóm tắt**

---

#### *Từ khóa:*

Hệ số lực cản cắt, Lực cắt, Mô hình lực cắt, Phay ngón phẳng

Trong nghiên cứu này, mô hình tuyến tính lực đã được phát triển trong đó góc xoắn của dao phay đã được đưa vào để tính toán hệ số lực cản cắt của quá trình phay. Dưới tác dụng của góc xoắn này, lực cắt trong quá trình gia công được xây dựng dựa trên các thành phần lực cắt tiếp tuyến, xuyên tâm và hướng trục. Ở điều kiện cắt ổn định, giá trị trung bình của lực cắt là được triển khai là một hàm tuyến tính của tốc độ đẩy dao. Và vì vậy, hệ số lực cản cắt được thành lập là một hàm số của lực cắt trung bình, và các thông số hình học của dao cắt như: đường kính dao, số răng, góc xoắn, ... Mô hình tính toán hệ số lực cản cắt này có thể được áp dụng với mỗi cặp dao cắt và vật liệu khác nhau. Mô hình dự đoán lực cắt đã được kiểm tra thành công bằng thực nghiệm.

---

### **Abstract**

---

#### *Keywords:*

Cutting force coefficients, Cutting force, Cutting force model, Cylindrical flat-end mill.

In this paper, a linear force model was developed in which the cutter's helix angle was incorporated to calculate the cutting force coefficients of the milling process. Affected by the cutter's helix angle, all derivations of cutting forces are directly based on the tangential, radial, and axial cutting force components. In the developed mathematical model, with the stable milling condition, the average cutting forces are expressed as a linear function of the feed rate. Thus the cutting force coefficient is formulated by a function of average cutting force and cutter geometry parameters such as cutter diameter, number of flutes, cutter's helix angle. This calculation model of cutting force coefficient can be applied to each pair of cutter and workpiece. The developed cutting force calculation model has been successfully verified by both simulation and experiment.

---

Ngày nhận bài: 05/8/2018

Ngày nhận bài sửa: 07/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

---

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Quá trình cắt kim loại có thể được phân tích bởi quá trình cắt đơn giản và cắt phức tạp. Tuy nhiên, trên thực tế quá trình cắt kim loại hầu hết là quá trình cắt phức tạp. Tính chất cơ học của quá trình cắt đơn giản và cắt phức tạp được nghiên cứu ở rất nhiều các nghiên cứu như Merchant [1] and Altintas [2].

Theo phương pháp truyền thống, hệ số lực cản cắt và hệ số lực cản cắt cạnh được xác định và hiệu chỉnh với mỗi cặp dao và vật liệu cắt khác nhau thông qua quá trình cắt thử nghiệm. Cách này có thể được áp dụng với nhiều quá trình cắt khác nhau như: Khoan, tiện, phay [2-4]. Các nghiên cứu chỉ ra rằng: Có hai phương pháp khác nhau trong việc xác định các hệ số lực cản cắt, phương pháp thứ nhất là phương pháp tính truyền từ cắt đơn giản sang cắt phức tạp, phương pháp thứ hai là xác định trực tiếp từ các thử nghiệm ở cắt phức tạp. [2].

Với phương pháp xác định trực tiếp, có hai mô hình thường được sử dụng để tính toán hệ số lực cản cắt. Mô hình thứ nhất: Hệ số lực cản cắt phụ thuộc vào giá trị trung bình của phoi cắt (Mô hình hàm số mũ của hệ số lực cản cắt). Mô hình này khá phức tạp trong việc đo và tính toán [5, 6]. Mô hình thứ hai: Hệ số lực cản cắt không phụ thuộc vào giá trị trung bình của phoi cắt, và việc xác định hệ số lực cản cắt có thể được thực hiện dựa trên mối quan hệ với giá trị lực cắt trung bình (Mô hình tuyến tính của lực cắt trung bình) [7, 8]. Tuy nhiên, với các nghiên cứu đã được thực hiện trong quá trình phay, dường như góc xoắn của dao cắt không được xem xét (hoặc coi như không ảnh hưởng) đến việc tính toán hệ số lực cản cắt nên mô hình hệ số lực cản cắt đã đơn giản hóa, và một số thành phần của hệ số lực cản cắt đã bị bỏ qua.

Nghiên cứu này đã được thực hiện để kiểm tra về mô hình tuyến tính của giá trị lực cắt trung bình. Từ đó xác định hệ số lực cản cắt trong quá trình phay. Bằng phương pháp thực nghiệm tất cả các hệ số lực cản cắt được xác định đồng thời mô hình toán học của lực cắt cũng được kiểm tra bằng các kết quả thực nghiệm.

## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 2.1. Mô hình toán học của lực cắt khi phay

Quá trình cắt bằng dao phay ngón phẳng được mô tả trên hình 1 và hình 2. Góc quay ( $\phi_j$ ) của răng thứ  $j$  được tính toán theo công thức (1).

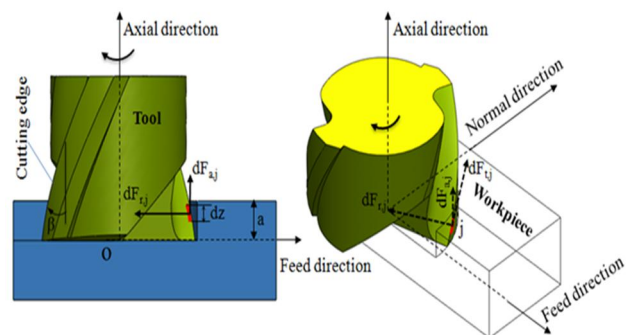
$$\phi_j = \phi_1 - (j - 1)\phi_P, \quad j = 1 \sim N_f \quad (1)$$

trong đó:  $\phi_P$  là là bước răng và  $\phi_1$  là góc quay của răng thứ 1.

Khi xem xét sự tác động của góc xoắn, góc trễ “ $\Psi$ ” ở mỗi chiều sâu cắt  $z$  được tính theo công thức (2).

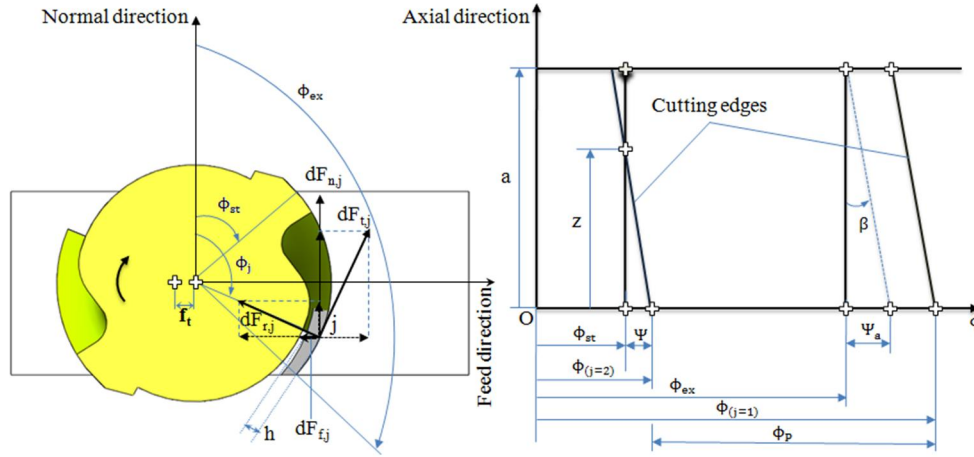
$$\Psi = \frac{2 \tan \beta}{D} z \quad (2)$$

Như vậy, với răng thứ  $j$ , ở chiều sâu cắt  $z$ , vị trí góc quay là  $\phi_j(z)$ . vị trí góc quay của các răng được tính theo công thức (3) và được mô tả trên hình 2.



Hình 1. Cấu tạo hình học của dao phay ngón phẳng

$$\phi_j(z) = \phi_j - \Psi = \phi_1 - (j-1)\phi_P - \Psi = \phi_1 - (j-1)\phi_P - \frac{2 \tan \beta}{D} z \quad (3)$$



**Hình 2.** Vị trí góc quay của các răng

Giả sử bán kính mũi cắt gần như bằng không, trên mỗi phân tử cắt, các lực cắt tiếp tuyến, xuyên tâm và dọc trục tác động trên mỗi răng được tính toán theo công thức (4).

$$\begin{cases} dF_{t,j}(\phi, z) = K_{te} * dz + K_{tc} * h_j(\phi_j(z)) * dz \\ dF_{r,j}(\phi, z) = K_{re} * dz + K_{rc} * h_j(\phi_j(z)) * dz \\ dF_{a,j}(\phi, z) = K_{ae} * dz + K_{ac} * h_j(\phi_j(z)) * dz \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó:  $K_{tc}$ ,  $K_{rc}$ ,  $K_{ac}$ ,  $K_{te}$ ,  $K_{re}$ ,  $K_{ae}$  là các hệ số lực cắt, bề dày tức thời của phoi  $h_j(\phi_j(z))$  được xác định theo công thức (5).

$$h_j(\phi_j(z)) = f_t \sin \phi_j(z) \quad (5)$$

Từ đó, lực cắt theo chiều ăn dao (feed), chiều pháp tuyến (normal), và chiều dọc trục (axial) được xác định theo công thức (6).

$$\begin{cases} dF_{f,j}(\phi, z) \\ dF_{n,j}(\phi, z) \\ dF_{a,j}(\phi, z) \end{cases} = \begin{bmatrix} -\cos \phi_j(z) & -\sin \phi_j(z) & 0 \\ \sin \phi_j(z) & -\cos \phi_j(z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} dF_{t,j}(\phi, z) \\ dF_{r,j}(\phi, z) \\ dF_{a,j}(\phi, z) \end{cases} \quad (6)$$

Tổng lực cắt trên mỗi răng được xác định theo công thức (7).

$$F_q(\phi_j(z)) = F_q(\phi, z) = \int_{z_{j,1}}^{z_{j,2}} dF_q(\phi, z), \quad q = f, n, a \quad (7)$$

Khi có hai hay nhiều răng cùng tham gia vào quá trình cắt thì lực cắt được xác định theo công thức (8).

$$F_f(\phi) = \sum_{j=1}^{N_f} F_{f,j}(\phi_j), \quad F_n(\phi) = \sum_{j=1}^{N_f} F_{n,j}(\phi_j), \quad F_a(\phi) = \sum_{j=1}^{N_f} F_{a,j}(\phi_j) \quad (8)$$

## 2.2. Xác định hệ số lực cản cắt khi phay

Lực cắt trung bình trên mỗi góc quay được xác định theo công thức (9).

$$\begin{cases} \bar{F}_f = \frac{N_f}{2\pi} \int_{\phi_{st}}^{\phi_{ex} + \Psi_a} \left( \int_{z_{j,1}}^{z_{j,2}} dF_{f,j}(\phi(z)) \right) d\phi \\ \bar{F}_n = \frac{N_f}{2\pi} \int_{\phi_{st}}^{\phi_{ex} + \Psi_a} \left( \int_{z_{j,1}}^{z_{j,2}} dF_{n,j}(\phi(z)) \right) d\phi \\ \bar{F}_a = \frac{N_f}{2\pi} \int_{\phi_{st}}^{\phi_{ex} + \Psi_a} \left( \int_{z_{j,1}}^{z_{j,2}} dF_{a,j}(\phi(z)) \right) d\phi \end{cases} \quad (9)$$

Theo [8], các hệ số lực cản cắt được xác định theo công thức (10).

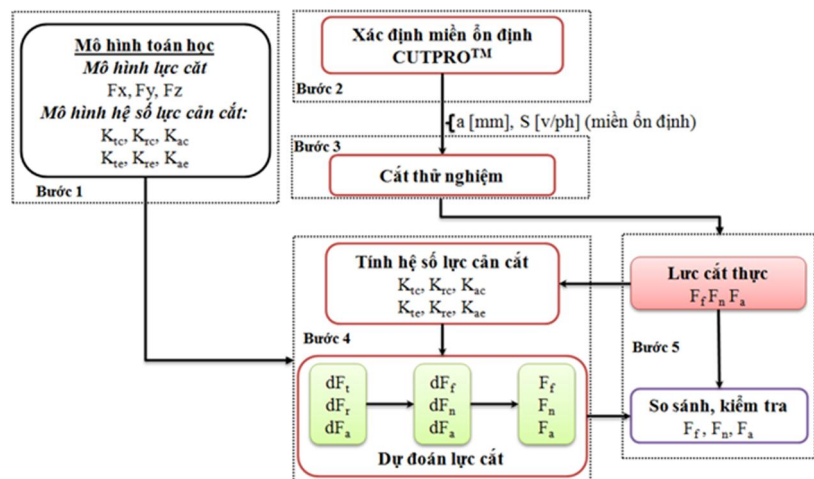
$$\begin{cases} K_{tc} = \frac{C_1 \bar{F}_{fc} - C_2 \bar{F}_{nc}}{C_1^2 + C_2^2} & K_{te} = \frac{C_3 \bar{F}_{fe} - C_4 \bar{F}_{ne}}{C_3^2 + C_4^2} \\ K_{rc} = \frac{C_2 \bar{F}_{fc} + C_1 \bar{F}_{nc}}{C_1^2 + C_2^2} & K_{re} = \frac{C_4 \bar{F}_{fe} + C_3 \bar{F}_{ne}}{C_3^2 + C_4^2} \\ K_{ac} = -\frac{\bar{F}_{ac}}{C_4} & K_{ae} = \frac{\bar{F}_{ae}}{C_5} \end{cases} \quad (10)$$

Trong đó:  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  là các hệ số được xác định từ điều kiện cắt lý thuyết;  $\bar{F}_f, \bar{F}_{fc}, \bar{F}_{fe}, \bar{F}_n, \bar{F}_{nc}, \bar{F}_{ne}, \bar{F}_a, \bar{F}_{ac}, \bar{F}_{ae}$  là các hệ số được xác định dựa vào giá trị trung bình của lực cắt.

## 3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

### 3.1. Quá trình thực hiện nghiên cứu

Quá trình nghiên cứu được tiến hành gồm có 5 bước như sơ đồ trên hình 3. Ở bước 1, hiện tượng phay được mô phỏng bằng các hiện tượng vật lý và cơ học, khi đó lực cắt và hệ số lực cản cắt được mô hình hóa bằng các hàm toán học (Đây là bước nghiên cứu lý thuyết). Từ bước 2 đến bước 5 là quá trình nghiên cứu và đánh giá kết quả thực nghiệm. Bước 2: Xác định miền ổn định khi cắt. Bước 3: Tiến hành cắt thử nghiệm với các điều kiện cắt cụ thể. Bước 4: Từ dữ liệu



Hình 3. Quá trình thực hiện nghiên cứu

thực nghiệm, hệ số lực cản cắt được xác định, đồng thời lực cắt được dự đoán thông qua mô hình toán học. Bước 5: Lực cắt thực và lực cắt dự đoán được so sánh để kiểm tra mô hình.

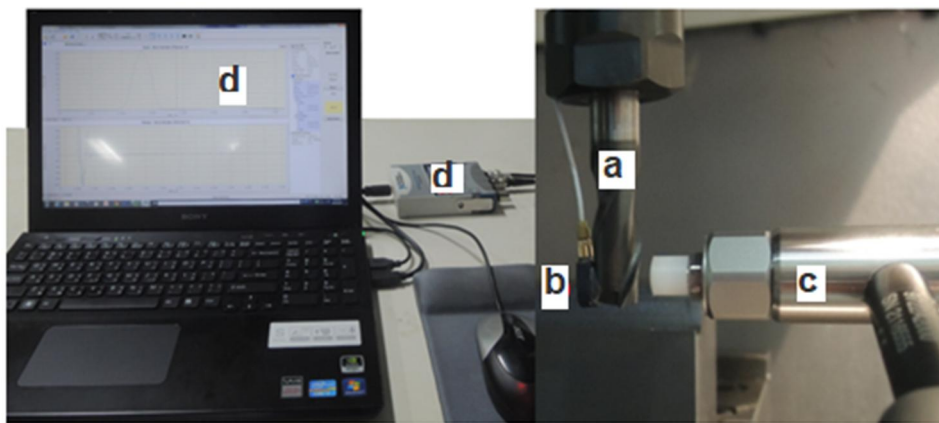
### 3.2. Nghiên cứu xác định điều kiện cắt ổn định

Để xác định hệ số lực cản cắt và kiểm tra mô hình toán học của lực cắt, một loạt các phay thử nghiệm được tiến hành. Trong các thực nghiệm này, lưỡi cắt bằng thép gió được chọn có các thông số: Đường kính  $D = 10$  mm, số răng  $N = 2$  răng, góc xoắn  $\beta = 30^\circ$ , góc sau  $\alpha_r = 5^\circ$ . Vật liệu gia công là thép xám FC25, có các thành phần hóa học được thể hiện trên bảng 1. Vật liệu có các thông số cơ học là: Mô đun đàn hồi:  $E = 109,5$  GPa, hệ số Poisson  $\mu = 0,29$ . Các thực nghiệm được thực hiện trên trung tâm gia công CNC 3 trục Tongtai TWV-720A.

**Bảng 1.** Thành phần hóa học của thép xám FC25

Thành phần (%)						
	C	Mn	Si	P	S	Fe
Min	2,44	0,39	1,83	0,15	-	
Max	3,02	0,52	2,03	0,30	0,15	Balance

Một hệ thống tích hợp gồm có đầu đo gia tốc (ENDEVCO-25B-10668), đầu đo lực (KISTLER-9722A2000), hộp xử lý dữ liệu (NI 9234), và phần mềm CUTPROTM được sử dụng để phân tích và xác định miền ổn định cho quá trình gia công phay. Hệ thống này được mô tả cụ thể trên hình 4.

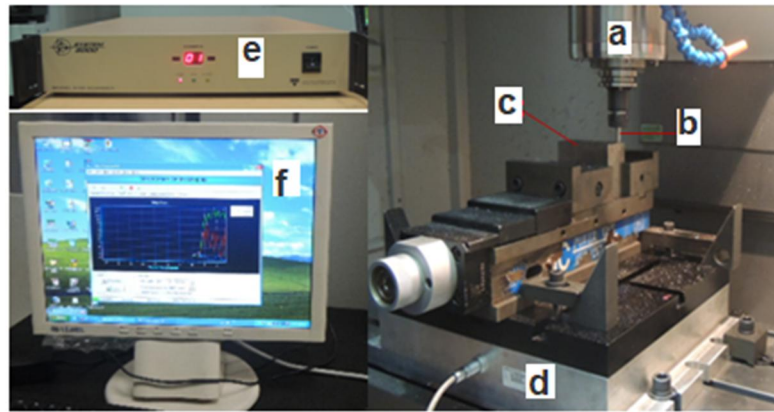


a. Dao cắt b. Đầu đo gia tốc c. Đầu đo lực  
d. Hộp xử lý dữ liệu e. Máy tính và phần mềm

**Hình 4.** Thiết lập thí nghiệm xác định miền ổn định

### 3.3. Phương pháp và thiết bị đo lực cắt

Hệ thống bao gồm đầu đo lực (type XYZ FORCE SENSOR, model 624-120-5KN), hộp xử lý dữ liệu và một máy tính được sử dụng để đo lực cắt. Chi tiết của hệ thống được thể hiện trên hình 5.



a. Máy CNC b. Dao cắt c. Phôi d. Đầu đo lực  
e. Bộ xử lý dữ liệu f. Máy tính và phần mềm

**Hình 5.** Thiết lập thí nghiệm đo lực cắt trong quá trình phay

Với mỗi chiều sâu cắt, quá trình cắt được thực hiện trên mỗi độ ăn dao khác nhau. Tốc độ quay của trục chính được giữ nguyên trong các thử nghiệm cắt. Các thông số cụ thể của điều kiện cắt được thể hiện trên bảng 2.

**Bảng 2.** Điều kiện cắt thử nghiệm

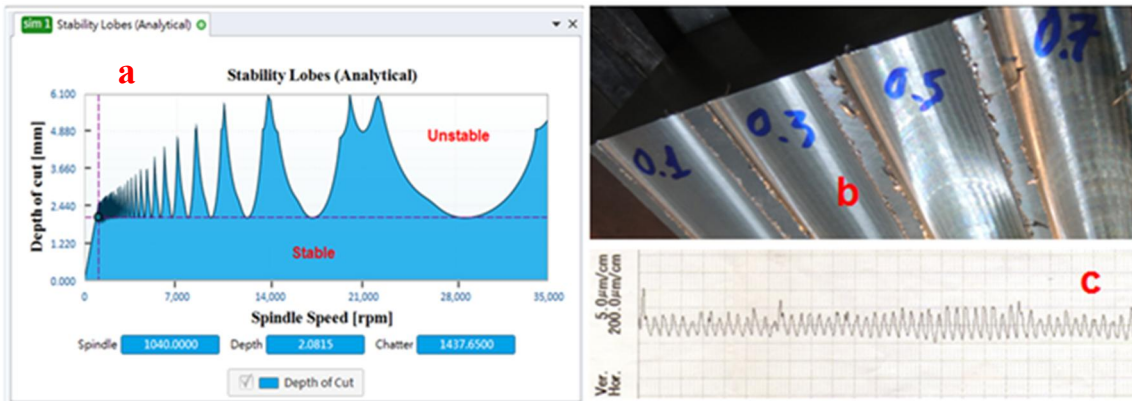
TT	Kiểu phay	a [mm]	Tốc độ trục chính [rpm]	Độ ăn dao [mm/răng]
1	Phay nghịch (1/2)	0,5	1000	0,05
2	Phay nghịch (1/2)	0,5	1000	0,10
3	Phay nghịch (1/2)	0,5	1000	0,15
4	Phay thuận (1/2)	0,5	1000	0,05
5	Phay thuận (1/2)	0,5	1000	0,10
6	Phay thuận (1/2)	0,5	1000	0,15
7	Phay rãnh	1,0	1000	0,05
8	Phay rãnh	1,0	1000	0,10
9	Phay rãnh	1,0	1000	0,15

## 4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 4.1. Kết quả xác định miền ổn định cho quá trình phay

Từ các kết quả đo hàm truyền phản hồi (FRF - frequency response function) của máy phay tại vị trí mũi cắt. Miền cắt ổn định khi phay bằng dao phay ngón phẳng được phân tích và biểu diễn trên hình 6. Trong đó: Miền ổn định là miền có màu xanh, miền mất ổn định là miền bên ngoài của màu xanh.

Những kết quả phân tích chỉ ra rằng quá trình gia công sẽ ổn định với chiều sâu cắt nhỏ hơn 2 mm với tốc độ vòng quay trục chính khác nhau. Và như vậy, việc lựa chọn điều kiện cắt để xác định hệ số lực cản cắt như ở bảng 2 là đảm bảo được điều kiện cắt ổn định.

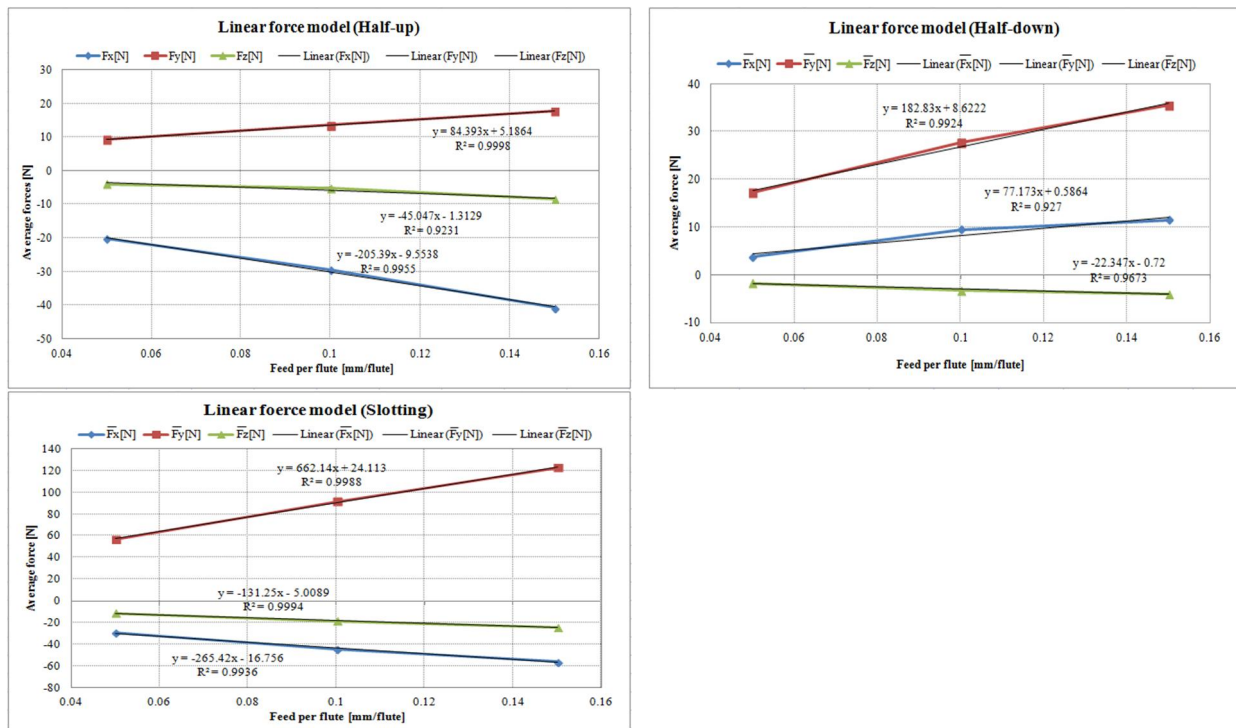


a. Buổi đồ miền ổn định b. Cắt thử các điểm ổn định c. Kiểm tra độ nhám tại điểm ổn định

**Hình 6.** Miền phay ổn định khi phay bằng dao phay ngón phẳng

#### 4.2. Mô hình tuyến tính của lực cắt trung bình và độ ăn dao

Mối quan hệ giữa lực cắt trung bình và độ ăn dao mỗi răng được phân tích và mô tả trên hình 7.



**Hình 7.** Mối quan hệ giữa lực cắt trung bình và độ ăn dao

Kết quả phân tích chỉ ra rằng, trên tất cả các chiều: Tiếp tuyến, xuyên tâm và dọc trục, giá trị tuyệt đối của lực cắt trung bình tăng khi độ ăn dao mỗi răng tăng. Ngoài ra, trên tất cả các chiều lực cắt trung bình có thể phân tích thành một hàm tuyến tính đối với độ ăn dao mỗi răng như được thể hiện bằng phương trình toán học như trên hình 7.

### 4.3. Kết quả xác định hệ số lực cản cắt trong quá trình phay

Sử dụng công cụ Fitting của phần mềm MATLABM và công cụ tuyến tính, hàm tuyến tính giữa lực cắt trung bình và độ ăn dao được xác định. Sau đó, sử dụng công thức (10), giá trị của các hệ số lực cản cắt được tính toán và tổng hợp trên bảng 3. Bằng phương pháp này, tất cả sáu hệ số lực cắt đều được xác định.

**Bảng 3.** Kết quả xác định hệ số lực cản cắt

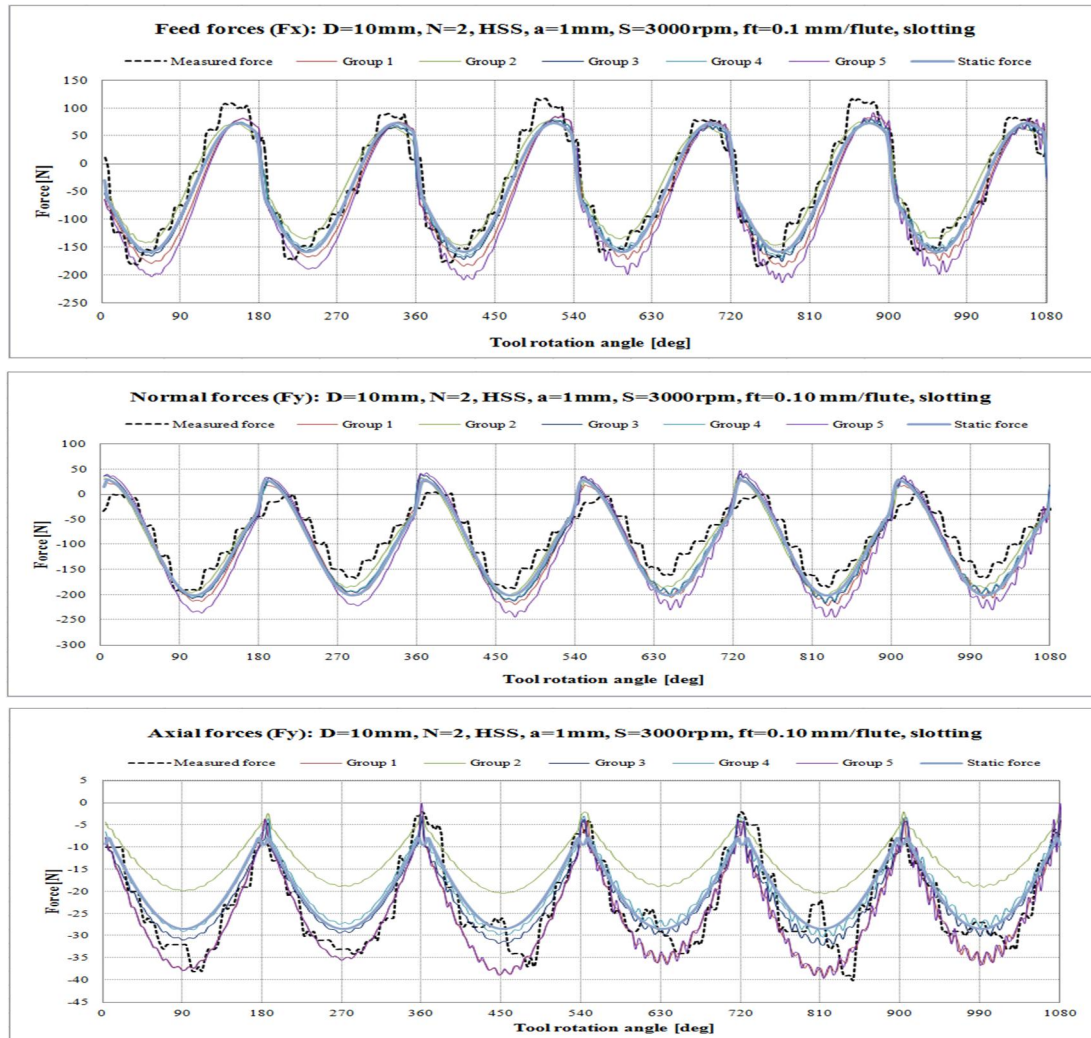
Nhóm		Hệ số lực cản cắt [N/mm <sup>2</sup> ]			Hệ số lực cạnh [N/mm]		
		Ktc	Krc	Kac	Kte	Kre	Kae
1	Phay nghịch (1/2)	1224,813	<b>865,182</b>	<b>-275,248</b>	<b>45,899</b>	15,054	<b>-5,452</b>
2	Phay thuận (1/2)	<b>1384,610</b>	282,901	-144,666	28,193	26,073	-2,990
3	Cắt rãnh	1324,712	531,013	-206,626	36,315	<b>28,478</b>	-5,200
4	Giá trị trung bình	1311,378	559,699	-208,847	36,802	23,202	-4,547
5	Với giá trị tuyệt đối lớn nhất	1384,610	865,182	-275,248	45,899	28,478	-5,452

Hệ số lực cản cắt được xác định với các kiểu phay khác nhau là: phay thuận, phay nghịch và phay rãnh. Kết quả chỉ ra rằng giá trị hệ số lực cản cắt được xác định đối với các kiểu phay khác nhau là khác nhau. Nguyên nhân của sự khác nhau này là do quá trình thực nghiệm chịu ảnh hưởng của một số yếu tố không thể điều khiển được như: rung động, độ biến dạng của dao cắt, nhiệt độ, ma sát, độ không đồng nhất của vật liệu,... Kết quả tính toán cũng chỉ ra rằng, giá trị tuyệt đối của hệ số lực cản cắt lớn hơn nhiều lần so với hệ số lực cạnh. Vì vậy, thành phần quan trọng trong tính toán lực cắt chính là hệ số lực cản cắt, trong một số nghiên cứu để thuận tiện cho quá trình tính toán, người ta có thể bỏ qua sự ảnh hưởng của hệ số lực cạnh đến lực cắt.

### 4.4. Kết quả so sánh, kiểm tra giữa mô hình lý thuyết và kết quả thực nghiệm

Sử dụng các kết quả hệ số lực cản cắt đã được tính toán trên bảng 3, các lực cắt được tính toán, dự đoán và được so sánh với kết quả lực cắt đã đo được. Các kết quả dự đoán và so sánh được mô tả trên hình 8. Kết quả so sánh chỉ ra rằng, có sự khác nhau giữa kết quả dự đoán lực cắt và lực cắt thực, nhưng sự khác nhau này tương đối nhỏ. Nguyên nhân của sự khác nhau này có thể là từ sự ảnh hưởng của nhiễu, rung động, độ không đồng đều của độ cứng vật liệu,... Những kết quả trên chỉ ra rằng kết quả dự đoán là tương đối thống nhất với kết quả thực nghiệm. Kết quả cũng chỉ ra các hệ số lực cản cắt của nhóm 5 có ý nghĩa lớn nhất, khi sử dụng các hệ số này, lực cắt dự đoán có biên độ lớn nhất và hầu như bao gọn biên độ của lực cắt thực. Vì vậy, mô hình lực cắt và mô hình xác định lực cản cắt được đề xuất từ nghiên cứu này có giá trị ứng dụng trong thực tế về tính toán thiết kế máy gia công, công cụ cắt, cũng như để dự đoán chất lượng bề mặt gia công.





Hình 8. Kết quả so sánh kiểm tra giữa mô hình lực cắt và kết quả lực cắt thực

## 5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã rút ra được các kết luận như sau:

- Mô hình tuyến tính giữa lực cắt trung bình và độ ăn dao đã được sử dụng thành công trong việc tính toán xác định hệ số lực cản cắt. Mô hình này được áp dụng ở điều kiện cắt ổn định.
- Ở điều kiện cắt ổn định, lực cắt trung bình là một hàm tuyến tính của độ ăn dao.
- Bằng mô hình và phương pháp nghiên cứu, tất cả 6 hệ số lực cản cắt trong quá trình phay bằng dao phay ngón phẳng đã được xác định. Đồng thời, mô hình toán học của lực cắt cũng đã được kiểm chứng thành công bởi các kết quả thực nghiệm. Mô hình này có thể được nghiên cứu và ứng dụng cho các quá trình cắt khác nhau, hoặc có thể được sử dụng để dự đoán rung động, sai số cũng như chất lượng bề mặt gia công.

## LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả cảm ơn sự hỗ trợ của Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, Trường Đại học Khoa học ứng dụng quốc gia Cao Hùng, Đài Loan, Công ty máy công cụ Tongtai, Đài Loan trong nghiên cứu.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Merchant M.E (1945) Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip. *J Appl Phys* 16:267. doi:10.1063/1.1707586.
- [2]. Altintas Y (2012) *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, 2nd edn. Cambridge University Press, New York, ISBN 978-1-00148-0.
- [3]. Fernández-Abia A.I, Barreiro J, López de Lacalle L.N, Martínez-Pellitero S (2012) Behavior of austenitic stainless steels at high speed turning using specific force coefficients. *Int J Adv Manuf Technol* 62:505–515.
- [4]. Guibert N, Paris H, Rech J (2008) A numerical simulator to predict the dynamical behavior of the self-vibratory drilling head. *Int J Mach Tools Manuf* 48:644–655.
- [5]. Perez H, Diez E, Marquez J. J, Vizan A (2013) An enhanced method for cutting force estimation in peripheral milling. *Int J Adv Manuf Technol* 69:1731–1741.
- [6]. Wang B, Hao H, Wang M, Hou J, Feng Y (2013) Identification of instantaneous cutting force coefficients using surface error. *Int J Adv Manuf Technol* 68:701–709.
- [7]. Wang M, Gao L, Zheng Y (2014) An examination of the fundamental mechanics of cutting force coefficients. *Int J Mach Tools Manuf* 78:1–7.
- [8]. Kao, Y. C., Nguyen, N. T., Chen, M. S., & Su, S. T., “A prediction method of cutting force coefficients with helix angle of flat-end cutter and its application in a virtual three-axis milling simulation system,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 77, Issue 9-12 , pp 1793-1809, 2015.