

XÂY DỰNG MÔ HÌNH LỰC CẮT KHI PHAY BỀ MẶT 3D BẰNG DAO PHAY NGÓN ĐẦU CẦU

DEVELOP MODEL OF CUTTING FORCE WHEN MILLING 3D SURFACES BY BALL-END MILL

Đậu Chí Dũng*, Trương Hoàng Sơn

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một số kết quả nghiên cứu về mô hình hóa lực cắt trong khi gia công bề mặt 3D bằng dao phay ngón đầu cầu. Trong quá trình gia công các bề mặt 3D bằng dao phay đầu cầu, vị trí tiếp xúc của lưỡi dao với bề mặt gia công thay đổi nên tiết diện cắt thay đổi làm cho lực cắt thay đổi. Điều này làm cho sự biến dạng của dao thay đổi và ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác hình học cũng như nhám bề mặt của chi tiết gia công. Trên cơ sở tính toán được tiết diện cắt khi phay đã xác lập được mối liên hệ giữa lực cắt với các thông số công nghệ như chiều sâu cắt, lượng chạy dao cũng như hình dáng chi tiết gia công và vị trí cắt của lưỡi cắt trên bề mặt chi tiết gia công. Từ đó có thể tính toán được lực cắt ở từng vị trí trên bề mặt gia công và dự đoán được sai số kích thước sẽ xuất hiện trên bề mặt gia công. Bài báo cũng trình bày một số kết quả thực nghiệm đã tiến hành khi gia công mặt cầu để đánh giá các tính toán lý thuyết và đưa ra công thức thể hiện mối quan hệ giữa các thông số trên đến lực cắt.

Từ khóa: Mặt 3D, dao phay đầu cầu, lực cắt, diện tích cắt, mô hình hóa, lát cắt.

ABSTRACT

This paper presented some research results about modeling the cutting force while milling 3D surfaces by a ball-end mill cutter. During milling of 3D surfaces by ball-end mill cutter, the contact position of the tool with the machined surface changes so that the cut section changes making the cutting force change. This causes the deformation of the tool to change and directly affect the geometry accuracy as well as the surface roughness of the workpiece. On the basis of calculating the cutting section when milling has established the relationship between cutting force and technological parameters such as cutting depth, feed rate as well as workpiece shape and cutting position of the tool on the workpiece surface. It is possible to calculate the cutting force at each position on the machining surface and predict the size error that will appear on the machining surface. The paper also presented some experimental results conducted when processing the spherical surface to evaluate theoretical calculations and formulating a formula to show the relationship between the above parameters and the cutting force.

Keywords: 3D surface, ball-end mill, cutting force, cutting area, modelling, cutting step.

Viện Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: dauchidung@gmail.com

Ngày nhận bài: 25/02/2019

Ngày nhận bài sửa: 11/4/2019

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2019

1. GIỚI THIỆU

Trong ngành chế tạo máy, việc gia công các chi tiết có bề mặt phức tạp (như các chi tiết khuôn, mẫu, các chi tiết trong ngành hàng không, trong động cơ,...), được làm bằng vật liệu khó gia công như thép hợp kim, thép chịu nhiệt, thép đã tôi,... ngày càng nhiều với yêu cầu kỹ thuật ngày càng cao. Khi gia công các bề mặt 3D có biên dạng cong thay đổi sẽ phải sử dụng đến dụng cụ cắt là dao phay đầu cầu. Với loại dao này, tùy thuộc vào vị trí tiếp xúc của đầu dao với bề mặt gia công mà tiết diện cắt, tốc độ cắt,... sẽ khác nhau. Điều này khiến cho lực cắt liên tục biến thiên, ảnh hưởng rất lớn đến độ chính xác gia công và chất lượng bề mặt. Tìm hiểu về lực cắt, đã có nhiều nhà khoa học nghiên cứu và đạt được một số kết quả nhất định, điển hình là các bài viết [4, 5, 6]. Các nghiên cứu đã công bố cho thấy các tác giả đã đánh giá được lực cắt khi phay bằng dao phay cầu thông qua các phân tích hình học, thông qua các phương pháp hồi quy thực nghiệm,... Tuy nhiên, chưa có tác giả nào đánh giá hết sự ảnh hưởng của vị trí tiếp xúc giữa dụng cụ cắt với bề mặt gia công, là một yếu tố có ảnh hưởng rất lớn đến lực cắt khi phay bề mặt 3D bằng dao phay cầu. Chính vì vậy cần có những nghiên cứu sâu hơn để có thể đánh giá tổng quát hơn các yếu tố ảnh hưởng đến lực cắt trong quá trình phay các bề mặt 3D.

2. TÍNH TOÁN LỰC CẮT KHI GIA CÔNG BẰNG DAO PHAY ĐẦU CẦU

Trong quá trình cắt, lực cắt được tính theo công thức sau [1]:

$$P = p \cdot q \quad (N) \quad (1)$$

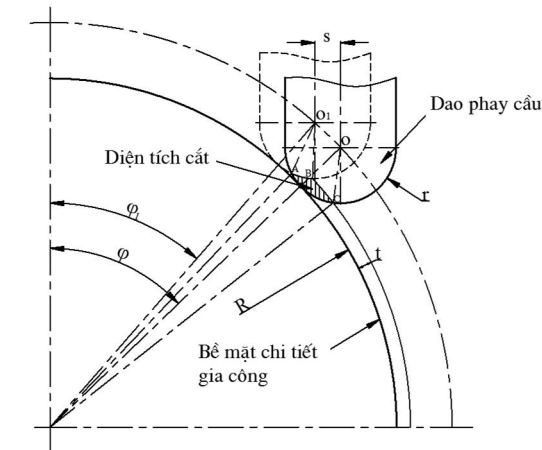
Trong đó:

q: Diện tích tiết diện lớp cắt được tách ra, nó phụ thuộc vào từng mô hình cắt cụ thể.

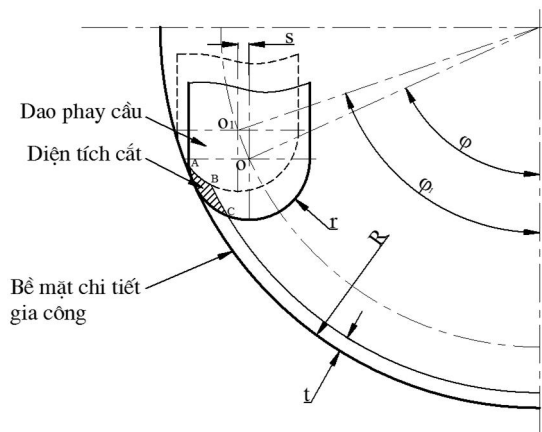
p: Lực cắt đơn vị. p là hằng số với 1 cặp dụng cụ cắt và phôi nhất định.

Như vậy, lực cắt P sẽ tỉ lệ thuận với diện tích tiết diện lớp cắt được tách ra q. Vấn đề phân tích, tính toán lực cắt bây giờ sẽ là việc tính toán diện tích lớp phoi được cắt ra.

Khi phay mặt cầu bằng dao phay cầu, diện tích cắt của một lần tiến dao được mô tả trên hình 1.



a, Mô hình mặt cầu lõm



b, Mô hình mặt cầu lồi

Hình 1. Mô hình hình học phay mặt cầu bằng dao đầu cầu

Trong đó:

R: Bán kính cong bề mặt gia công.

t: Lượng dư gia công.

s: Lượng dịch dao ngang mỗi lần chuyển đường chạy dao.

r: Bán kính mũi dao.

Như vậy, tiết diện mặt cắt tại vị trí tiếp xúc của dao và chi tiết gia công ứng với góc φ được tính toán ứng với công thức sau:

Tiết diện mặt cắt được tính toán theo công thức sau [3]:

$$q = \int_{x_A}^{x_B} |f_1(x) - f_2(x)| dx + \int_{x_B}^{x_C} |f_3(x) - f_2(x)| dx \quad (2)$$

Trong đó:

$f_1(x)$: Phương trình đường lưỡi cắt dụng cụ ở lát cắt trước.

$f_2(x)$: Phương trình bề mặt phôi.

$f_3(x)$: Phương trình đường lưỡi cắt dụng cụ ở lát cắt hiện tại.

Từ các công thức (1), (2), công thức tính lực cắt khi phay mặt cầu bằng dao phay đầu cầu được xác định như sau:

$$P = p \cdot \left[\int_{x_A}^{x_B} |f_1(x) - f_2(x)| dx + \int_{x_B}^{x_C} |f_3(x) - f_2(x)| dx \right] \quad (3)$$

Trong đó:

$f_1(x), f_2(x), f_3(x)$: Các hàm phụ thuộc biên dạng bề mặt và các thông số công nghệ.

p: Lực cắt đơn vị, là hằng số phụ thuộc vào vật liệu chi tiết gia công. Theo các nhà nghiên cứu về cắt gọt thì lực cắt đơn vị p có thể biểu diễn gần đúng trong mối quan hệ với độ bền σ_B của vật liệu (nếu là vật liệu dẻo) hoặc độ cứng HB của vật liệu (nếu là vật liệu giòn). Thực tế khi cắt với dao lưỡi cắt đơn, từ thực nghiệm và các tài liệu về nguyên lý gia công vật liệu thì [1]:

+ p = (2,5 – 4,5) σ_B đối với vật liệu dẻo.

+ p = (0,5 – 1,0) HB đối với vật liệu giòn.

Trong đó, giá trị hệ số nhỏ dùng khi cắt với chiều dày cắt a lớn và ngược lại.

Công thức (3) là công thức tổng quát biểu diễn mối quan hệ giữa lực cắt với các thông số công nghệ của quá trình cắt gọt. Trong công thức này các giá trị bán kính cong của bề mặt R, bán kính mũi dao r, bước dịch dao ngang s và lượng dư gia công t là các tham số. Vì vậy, giả sử khi gia công mặt cầu với các điều kiện như sau:

- Bán kính cầu: R = 15 mm.

Bảng 1. Tiết diện cắt q và lực cắt P dự đoán khi phay mặt cầu lõm

Góc φ (°)	t = 0,2						t = 0,3					
	s = 0,05mm		s = 0,1mm		s = 0,15mm		s = 0,05mm		s = 0,1mm		s = 0,15mm	
	q (mm ²)	P (N)	q (mm ²)	P (N)	q (mm ²)	P (N)	q (mm ²)	P (N)	q (mm ²)	P (N)	q (mm ²)	P (N)
0	0,008	1,800	0,015	3,624	0,023	5,424	0,011	2,736	0,023	5,448	0,033	7,968
10	0,008	1,848	0,015	3,672	0,023	5,520	0,012	2,76	0,023	5,544	0,035	8,304
20	0,008	1,920	0,016	3,864	0,024	5,784	0,012	2,904	0,024	5,808	0,036	8,688
30	0,009	2,088	0,018	4,200	0,026	6,288	0,013	3,144	0,026	6,288	0,039	9,408
40	0,010	2,376	0,020	4,752	0,030	7,128	0,015	3,552	0,030	7,104	0,044	10,632
50	0,012	2,832	0,024	5,664	0,035	8,496	0,018	4,224	0,035	8,448	0,053	12,624
60	0,015	3,648	0,030	7,296	0,046	10,992	0,023	5,424	0,046	10,944	0,067	16,128
70	0,022	5,352	0,045	10,800	0,068	16,296	0,033	7,896	0,065	15,624	0,097	23,16
80	0,045	10,872	0,094	22,656	0,147	35,376	0,063	15,096	0,121	29,016	0,175	41,904
90	0,200	48,072	0,264	63,456	0,300	72,024	0,308	73,944	0,417	100,032	0,487	116,88

Bảng 2. Tiết diện cắt q và lực cắt P dự đoán khi phay mặt cầu lõm

Góc φ ($^{\circ}$)	t = 0,2						t = 0,3					
	s = 0,05mm		s = 0,1mm		s = 0,15mm		s = 0,05mm		s = 0,1mm		s = 0,15mm	
	q (mm 2)	P (N)	q (mm 2)	P (N)	q (mm 2)	P (N)	q (mm 2)	P (N)	q (mm 2)	P (N)	q (mm 2)	P (N)
0	0,015	3,624	0,030	7,200	0,045	10,704	0,022	5,352	0,045	10,680	0,067	16,032
10	0,015	3,624	0,030	7,248	0,045	10,896	0,023	5,424	0,045	10,872	0,068	16,296
20	0,016	3,792	0,032	7,584	0,048	11,424	0,024	5,688	0,048	11,400	0,071	17,088
30	0,017	4,128	0,034	8,232	0,052	12,432	0,026	6,192	0,052	12,384	0,078	18,600
40	0,019	4,656	0,039	9,288	0,059	14,088	0,029	7,008	0,058	14,016	0,088	21,072
50	0,023	5,544	0,046	11,016	0,070	16,872	0,035	8,352	0,070	16,776	0,105	25,248
60	0,030	7,080	0,059	14,040	0,091	21,912	0,045	10,776	0,091	21,720	0,137	32,832
70	0,043	10,248	0,084	20,040	0,138	33,072	0,066	15,936	0,135	32,496	0,207	49,776
80	0,079	19,056	0,148	35,472	0,292	70,080	0,140	33,672	0,316	75,888	0,537	128,920
90	0,137	32,880	0,369	88,464	0,419	100,560	0,427	102,456	0,577	138,576	0,675	161,952

- Vật liệu chi tiết: thép C45 có độ cứng, tương đương với lực cắt đơn vị là 240N/mm 2 .

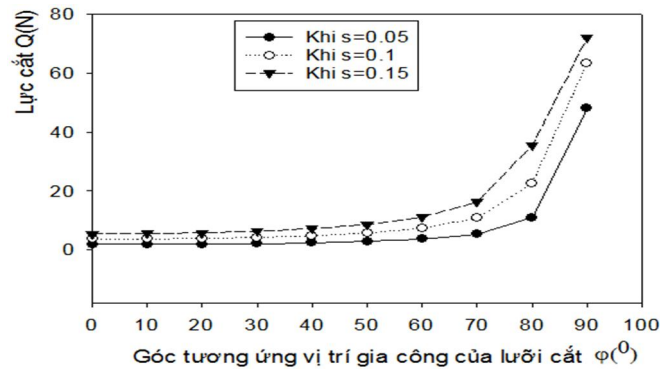
- Dụng cụ cắt: Dao phay ngón đầu cầu có bán kính mũi dao r = 5 mm.

- Lượng dư gia công: t = 0,2 và 0,3 mm.

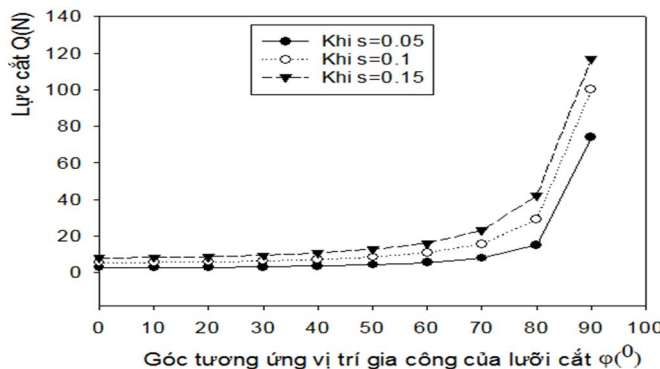
- Bước tiến dao ngang: s = 0,05; 0,1 và 0,15 mm.

thì lực cắt tại các vị trí gia công ứng với các góc φ có thể được tính toán dựa theo công thức (3) khi sử dụng phần mềm tính toán Maple và được chỉ ra trong các bảng 1 và 2.

Từ các giá trị liệt kê trong các bảng 1 và 2 ta có lực cắt dự đoán sẽ phụ thuộc vào góc φ như các đồ thị hình 2, 3.

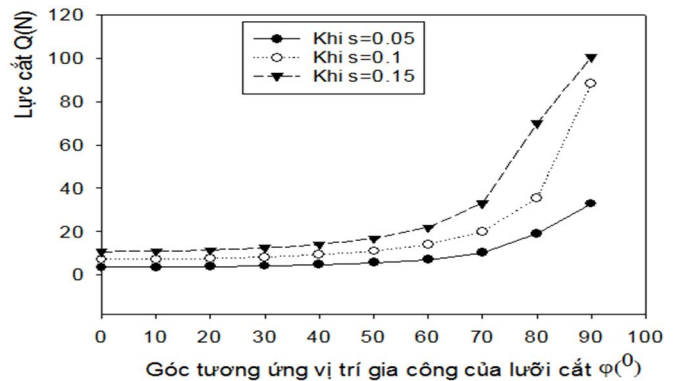


a. Khi t = 0,2mm

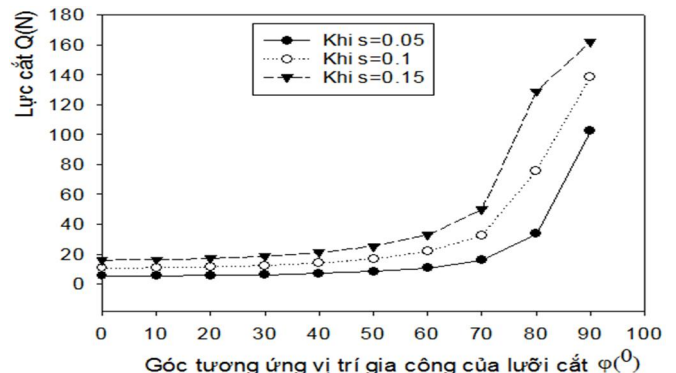


b. Khi t = 0,3mm

Hình 2. Dự đoán mối quan hệ giữa góc φ và lực cắt khi phay mặt cầu lõm



a. Khi t = 0,2mm



b. Khi t = 0,3mm

Hình 3. Dự đoán mối quan hệ giữa góc φ và lực cắt khi phay mặt cầu lõm

Như vậy, theo công thức (3), (4) và đồ thị hình 2, 3 có thể dễ dàng nhận thấy tiết diện cắt và lực cắt tăng theo hàm số mũ khi góc φ tăng. Điều đó có nghĩa là lực cắt lớn nhất được dự báo là khi ở những vị trí lần cắt cuối cùng khi phay mặt cầu lõm.

3. THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ ĐỘ CHÍNH XÁC CỦA MÔ HÌNH TÍNH LỰC CẮT ĐÃ ĐƯỢC THIẾT LẬP

3.1. Thiết bị thí nghiệm

- Máy gia công: Thực nghiệm được tiến hành trên máy phay CNC HS Super MC 500, tại Trung tâm đào tạo kỹ thuật HaUI-Foxconn, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội (hình 4).



Hình 4. Máy phay CNC HS Super MC500

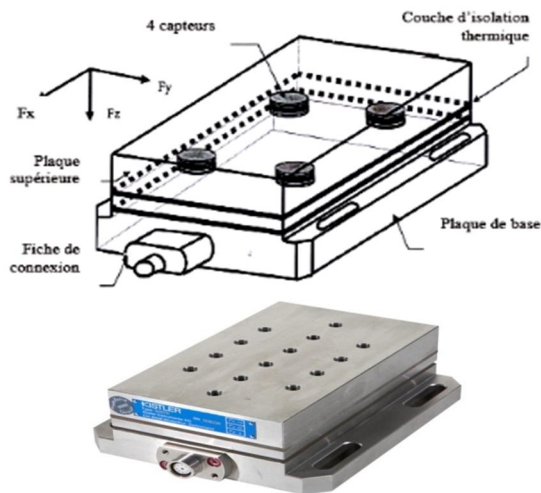
- Dụng cụ cắt: sử dụng dao phay ngón đầu cầu GS Mill 2GSR5 có bán kính đầu dao $r = 5\text{mm}$ của hãng Nachi - Nhật Bản (hình 5).



Hình 5. Dao phay cầu GS Mill 2GSR5

- Thiết bị đo:

+ Đo lực cắt: sử dụng lực kế đo lực cắt 3 thành phần của hãng Kistler - Thụy Sĩ tại Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội (hình 6).



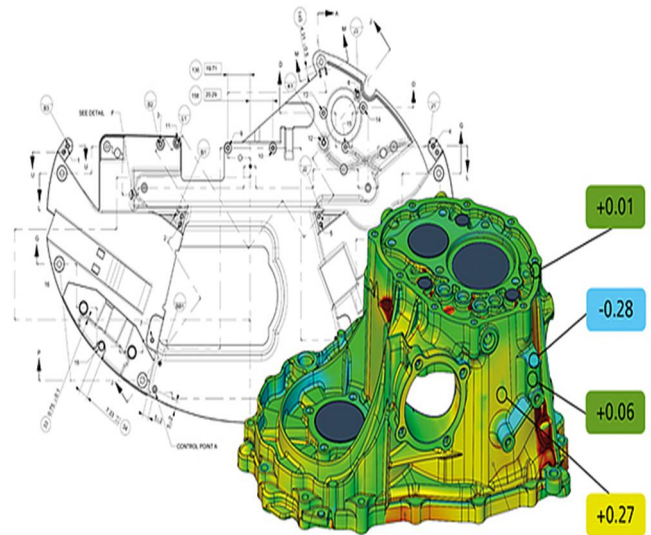
Hình 6. Lực kế của hãng Kistler-Thụy Sĩ

+ Đo bề mặt sau khi gia công: Sử dụng máy Scan 3D ATOS Triple Scan của hãng ATOS - Đức (hình 7).



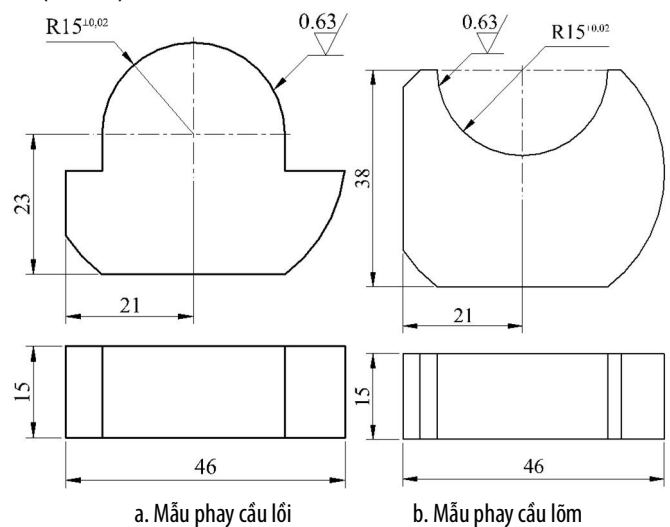
Hình 7. Máy Scan 3D ATOS Triple Scan

Dữ liệu thu được sau khi Scan 3D được đưa vào phần mềm GOM Inspect để so sánh bản Scan 3D bề mặt đã gia công với bề mặt chuẩn (theo bản vẽ thiết kế) (hình 8).



Hình 8. Phần mềm GOM Inspect so sánh bề mặt gia công với bề mặt chuẩn

- Mẫu cắt: Phôi thép C45 đã được gia công thô và gia công bán tinh tạo hình đảm bảo độ chính xác về lượng dư gia công, chuẩn gia công và chuẩn đo lường. Yêu cầu gia công mặt cầu đạt kích thước và chất lượng bề mặt theo bản vẽ (hình 9).



Hình 9. Bản vẽ mẫu thực nghiệm

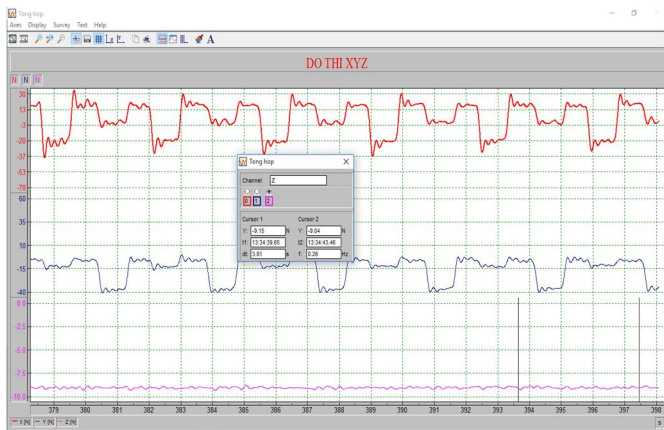
Thông số hình học của phôi đã được lựa chọn theo giả thuyết đưa ra trong phần 3.1, chế độ cắt được lựa chọn theo bảng khuyến nghị của nhà sản xuất dụng cụ dựa trên cơ sở độ cứng của vật liệu gia công.

- Tốc độ quay trục chính: $n = 3200$ vòng/phút.

- Bước tiến dao: $F = 700$ mm/phút.

3.2. Kết quả thực nghiệm

Kết quả đo được thu thập và xử lý bằng phần mềm DaisyLab. Lực cắt được thu thập dữ liệu của 3 thành phần P_x , P_y , P_z . Hình 10, 11 là một số hình ảnh thu được khi đo.



Hình 10. Lực cắt đo được khi phay mặt cầu lõi với lượng dư $t = 0,2$, bước dịch dao ngang $s = 0,1$ và ở góc $\varphi = 80^\circ$



Hình 11 Lực cắt đo được khi phay mặt cầu lõm với lượng dư $t = 0,2$, bước dịch dao ngang $s = 0,1$ và ở góc $\varphi = 80^\circ$

Lực cắt tổng P sẽ được tính toán theo công thức (4):

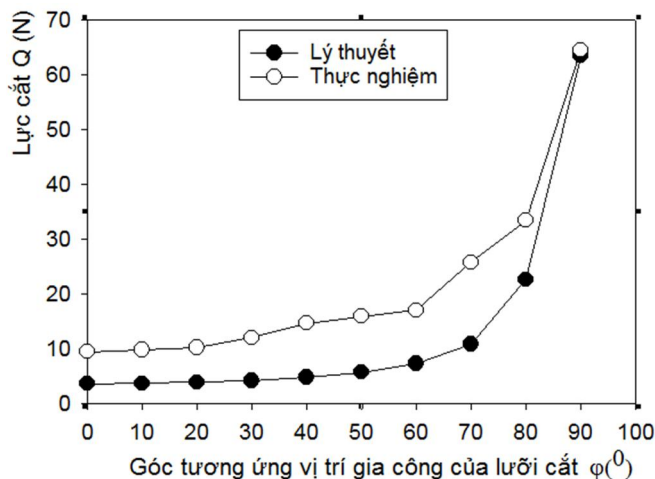
$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2} \quad (4)$$

Từ những kết quả thu được, qua quá trình phân tích đánh giá từ kết quả khi phay loạt nhiều mẫu cắt. Các giá trị trung bình của các thành phần lực cắt và lực cắt tổng theo góc φ được cho ở bảng 3.

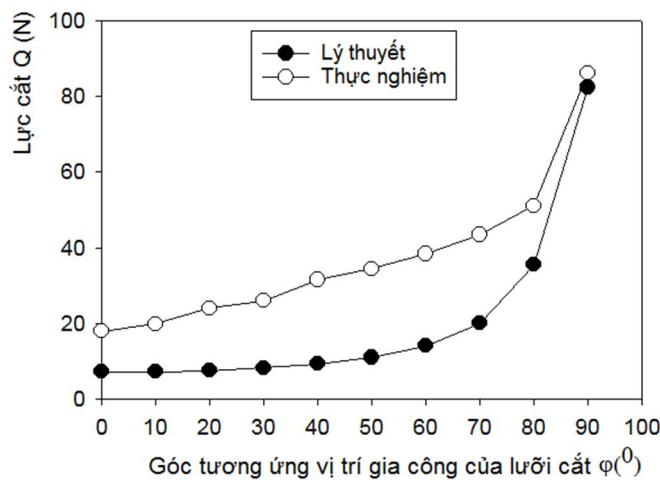
Bảng 3. Lực cắt đo được khi phay mặt cầu với: $t = 0,2\text{mm}$, $s = 0,1\text{mm}$.

Góc φ ($^\circ$)	Khi phay mặt cầu lõi				Khi phay mặt cầu lõm			
	P_x (N)	P_y (N)	P_z (N)	P (N)	P_x (N)	P_y (N)	P_z (N)	P (N)
0	-2,470	0,610	-9,080	9,430	-10,520	11,900	-8,430	17,982
10	-3,730	1,010	-8,990	9,785	-12,580	12,890	-8,270	19,819
20	-4,480	1,560	-9,070	10,236	-14,980	16,680	-8,480	23,969
30	-7,550	2,400	-9,020	12,005	-15,640	19,040	-8,330	26,010
40	-11,250	3,150	-8,860	14,662	-20,790	22,240	-8,360	31,571
50	-12,080	4,930	-9,100	15,907	-22,990	24,180	-8,460	34,421
60	-13,340	5,130	-9,030	16,985	-26,860	26,100	-8,410	38,385
70	-18,610	8,070	-8,980	25,764	-30,570	29,720	-8,440	43,463
80	-28,720	14,230	-9,080	33,387	-35,210	36,030	-8,390	51,071
90	-61,450	17,454	-9,150	64,533	-60,510	49,610	-8,480	86,247

Từ bảng số liệu trên bảng 1, 2 và 3, xây dựng được đồ thị xác định ảnh hưởng của góc φ đến lực cắt thực tế. Lực cắt này được so sánh với lực cắt dự đoán trên lý thuyết ở đồ thị hình 12.



a. Khi phay mặt cầu lõi



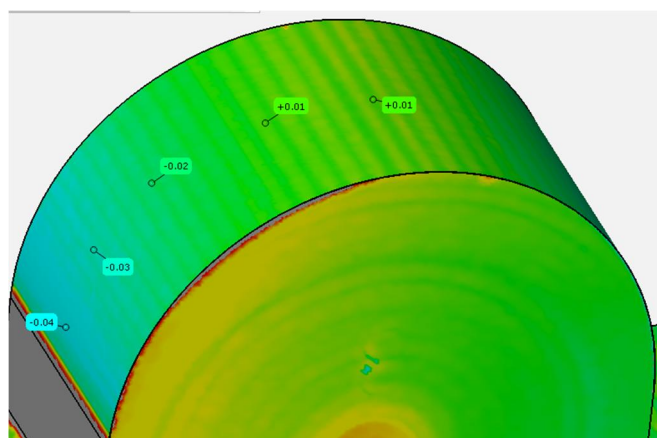
b. Khi phay mặt cầu lõm

Hình 12. So sánh lực cắt trên lý thuyết và lực cắt thực khi $t = 0,2\text{mm}$ và $s = 0,1\text{mm}$

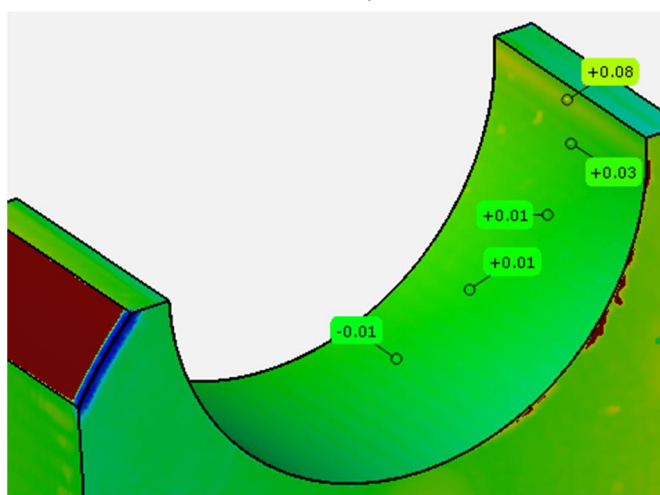
Trên hình 12, nhận thấy lực cắt thực tế đo được khá phù hợp với lực cắt được tính toán theo lý thuyết.

Lực cắt được dự đoán theo lý thuyết cũng như lực cắt thực tế có sự thay đổi lớn bắt đầu từ khi góc φ tăng đến 60° và tăng càng nhanh khi góc φ càng lớn. Điều này có thể dự đoán được sai số kích thước gia công trên bề mặt chi tiết sẽ tăng nhanh bắt đầu từ góc φ đạt khoảng 60° và sai số lớn nhất sẽ ở góc $\varphi = 90^\circ$.

Lực cắt sẽ gây ra biến dạng dụng cụ cắt dẫn đến sai số hình học bề mặt gia công. Sự thay đổi lực cắt theo góc φ có thể cho ta dự đoán sai số hình học bề mặt cũng sẽ thay đổi tương ứng theo góc φ . Nghĩa là ở góc φ lớn thì lực cắt lớn và sẽ dẫn đến sai số hình học bề mặt cũng sẽ lớn. Kết quả so sánh bề mặt gia công với bề mặt chuẩn bằng phần mềm Gom Inspect cũng cho thấy điều này (hình 13 a và b)



a. So sánh bề mặt cầu lồi



b. So sánh bề mặt cầu lõm

Hình 13. So sánh bề mặt gia công (dữ liệu Scan 3D bề mặt gia công) với bề mặt chuẩn (bản vẽ thiết kế) bằng phần mềm Gom Inspect

4. KẾT LUẬN

Từ những kết quả trên, một số kết luận sau được rút ra là:

- Nghiên cứu đã xây dựng được mô hình tính toán lực cắt phụ thuộc vào thông số hình học của bề mặt gia công, dụng cụ cắt và một số thông số công nghệ như lượng dư gia công, bước dịch dao ngang.

- Các số liệu nghiên cứu thực nghiệm cho thấy sự chính xác của mô hình lực cắt đã xây dựng, còn một số sai lệch về giá trị giữa thực nghiệm và mô hình lý thuyết có thể được giải thích bởi khi cắt thực tế, ngoài sự ảnh hưởng của các thông số được tính toán thì lực cắt còn chịu sự ảnh hưởng của các thông số ngẫu nhiên không thể kiểm soát được như: độ cứng vững của hệ thống công nghệ, sự không đồng đều về tính chất của vật liệu gia công,... Tuy nhiên, dạng ảnh hưởng của vị trí tiếp xúc của dụng cụ cắt với bề mặt gia công (thể hiện bởi góc φ) tới lực cắt là đúng như mô hình tính toán.

- Từ mô hình lực cắt cũng đã dự đoán được các sai số xuất hiện tại các vị trí gia công và kết quả thực nghiệm cũng đã cho thấy sự đúng đắn của các dự đoán này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Bành Tiến Long, Trần Thế Lục, Trần Sỹ Túy, 2013. *Nguyên lý gia công vật liệu*. NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.

[2]. Trần Mạnh Hà, Bành Tiến Long, Bùi Ngọc Tuyên, 2014. *Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng một số yếu tố công nghệ đến tốc độ biến đổi lực cắt trung bình khi tạo hình bề mặt tự do dạng lõm elip trên máy phay CNC 3 trục*. Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật - Học viện Kỹ thuật Quân sự số 165 (12 – 2014) (132 – 138).

[3]. Đậu Chí Dũng, Trương Hoàng Sơn, Nguyễn Hồng Linh, 2018. *Đánh giá độ chính xác gia công khi phay mặt trụ lõm bằng dao phay cầu*, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Số 1+2, trang 109-115.

[4]. Chung-Liang Tsai, Yunn-Shiuan Liao, 2008. *Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 205, Issues 1–3, 26 August 2008, Pages 24–33.

[5]. Bin Lin, Lei Wang, Yu Guo, Jiming Yao, 2016. *Modeling of cutting forces in end milling based on oblique cutting analysis*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 84, Issue 1–4, pp 727–736

[6]. M.Milfelner, J.Kopac, F.Cus, U.Zuperl, 2005. *Genetic equation for the cutting force in ball-end milling*, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 164–165, Pages 1554-1560.

AUTHORS INFORMATION

Dau Chi Dung, Truong Hoanh Son

School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology