

Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số cắt đến hệ số co rút phoi và độ nhám bề mặt khi gia công hợp kim nhôm A6061

Study on effects of cutting parameters to the chip shrinkage coefficient and surface roughness when machining aluminum alloy A6061

Phạm Thị Hoa^{1,*}, Đoàn Thị Hương¹, Nguyễn Quang Việt²,
Bành Tiến Long¹, Nguyễn Đức Toàn¹

¹Trường Đại học Sư Phạm Kỹ thuật Hưng Yên

²Trường Đại học Sao đỏ

*Email: hoapt2108@gmail.com

Tel: +84-221.3.713.519; Mobile: 097.6983.452

Tóm tắt

Từ khóa:

Hệ số co rút phoi, nhám bề mặt, hình thái hình học phoi, hợp kim nhôm A6061.

Trong quá trình phay các thông số cắt có ảnh hưởng quan trọng đến chất lượng và năng suất gia công. Các hiện tượng xảy ra trong quá trình gia công đều thể hiện trên bề mặt chi tiết sau gia công được thể hiện bằng độ nhám bề mặt và hình thái hình học của phoi hình thành. Chỉ tiêu đánh giá mức độ biến dạng của phoi là chỉ tiêu hệ số co rút phoi. Hệ số co rút phoi và độ nhám bề mặt phản ánh ảnh hưởng của các thông số cắt trong quá trình gia công. Do vậy nghiên cứu này tiến hành đánh giá ảnh hưởng của các thông số vận tốc cắt, lượng chạy dao và chiều sâu cắt đến hệ số co rút phoi và độ nhám bề mặt bằng thực nghiệm khi phay hợp kim nhôm A6061. Phân tích hình thái hình học của phoi hình thành khi thay đổi các thông số cắt khác nhau. Kết quả nghiên cứu đánh giá xu thế ảnh hưởng của các thông số cắt đến hệ số co rút phoi, độ nhám bề mặt và hình thái hình học phoi hình thành. Lựa chọn được các thông số công nghệ phù hợp cho năng suất và chất lượng gia công là tốt nhất.

Abstract

Keywords:

Chip shrinkage coefficient, surface roughness, shape morphology of chip formation, aluminum alloy A6061

In milling process, cutting parameters have an important influence on quality and machining productivity. The phenomena occurring during the milling process are shown on the surface of the workpiece being represented by the surface roughness and the geometrical geometry of the forming chip. A criterion for determining the degree of deformation of the chip is the chip shrinkage coefficient. Chip shrinkage coefficient and surface roughness reveal the effect of the cutting parameters during machining. This study examines the effects of the cutting speed, the feed rate, and the uncut chip thickness on the chip shrinkage coefficient and the surface roughness in the experimental aluminum alloy milling. By analyzing the geometry of the chip formed when changing the cutting parameters, the results show that the chip shrinkage coefficient, the surface roughness and the shape morphology of chip formation are influenced by the cutting parameters including V , S , and t . Base on the best productivity and quality of the work, the appropriately technical parameters will be selected.

Ngày nhận bài: 20/7/2018

Ngày nhận bài sửa: 13/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. GIỚI THIỆU

Khi gia công cắt gọt, các hiện tượng xảy ra trong quá trình cắt ảnh hưởng đến năng suất và chất lượng sản phẩm chi tiết gia công. Sự biến dạng của phoi trong quá trình cắt phụ thuộc rất nhiều các yếu tố như: Đặc tính của vật liệu gia công (thành phần hóa học, các cơ tính vật lý của vật liệu), điều kiện gia công (các thông số công nghệ của chế độ cắt, môi trường gia công...), những thay đổi về đặc điểm của vùng cắt cơ sở, sự thay đổi trong vùng tiếp xúc giữa dao - phoi. Các tương tác giữa vùng cắt thứ nhất và vùng cắt thứ hai, động học của hệ thống máy-dao- đồ gá và mối quan hệ của nó với quá trình cắt [1]. Hệ số co rút phoi (K) là một thông số quan trọng quyết định sự tiến triển của quá trình cắt. Sự thay đổi của K cũng kéo theo sự thay đổi của các yếu tố trong quá trình cắt như (lực cắt, nhiệt cắt, vật liệu gia công, vật liệu dao...). Các nghiên cứu gần đây cũng đã đề cập nhiều đến quá trình hình thành và biến dạng của phoi như nghiên cứu nhóm tác giả A.Rathi [2] đã phân tích hình thái hình học của phoi hình thành khi gia công ADC12-10SiC. Nghiên cứu cũng đưa ra các biểu đồ ảnh hưởng của các kích thước chiều dài, chiều rộng phoi với các thông số cắt. Aykut cùng nhóm tác giả [3] đã đưa ra mối quan hệ giữa hình thái hình học của phoi hình thành với lực cắt khi gia công khi sử dụng các dụng cụ cắt khác nhau. Các nghiên cứu [4][5][6] phân tích hình thái của phoi ảnh hưởng đến lực cắt, nhiệt độ, mài mòn... xảy ra của quá trình gia công.

Quá trình gia công đều thể hiện trên bề mặt gia công và đánh giá bằng độ nhám bề mặt. Nghiên cứu về độ nhám bề mặt là vấn đề cấp thiết mà rất nhiều các nhà khoa học quan tâm vì mỗi điều kiện gia công và vật liệu gia công khác nhau thì độ nhám bề mặt lại có các kết quả không giống nhau. Nghiên cứu của Felho [7] đã đưa ra mô hình tính toán độ nhám bề mặt khi phay mặt phẳng. Cui cùng nhóm tác giả [8] đã đánh giá ảnh hưởng của nhám bề mặt với các thông số chế độ cắt, tương ứng với các thông số cắt nghiên cứu cũng đã phân tích quá trình hình thành và hình thái của phoi khi gia công thép AISI H13. Trong các nghiên cứu [9][10][11] cũng đưa ra ảnh hưởng của các thông số cắt đến độ nhám bề mặt và một số các hiện tượng xảy ra trong quá trình cắt như lực cắt, mài mòn....

Nghiên cứu này phân tích hình thái hình học của phoi hình thành trong quá trình gia công hợp kim nhôm A6061 với sự thay đổi của các thông số công nghệ. Cụ thể là đưa ra các biểu đồ thể hiện quy luật ảnh hưởng của các thông số cắt đến hệ số co rút phoi và độ nhám bề mặt. Từ việc phân tích sự ảnh hưởng đó giúp cho nhà công nghệ lựa chọn được các thông số cắt phù hợp cho năng suất và chất lượng gia công tốt nhất.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

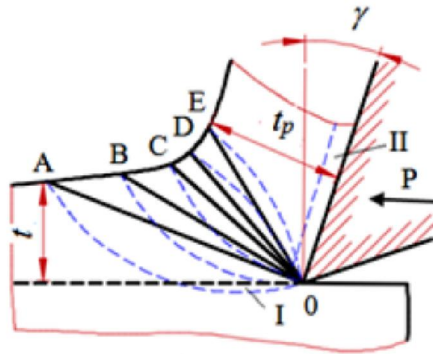
2.1. Điều kiện thực nghiệm

2.1.1. Cơ sở quá trình tạo phoi và cách xác định hệ số co rút phoi

Quá trình tạo phoi

Để tạo phoi khi gia công cần một lực tác dụng vào dao phải đủ lớn để tạo ra trong lớp kim loại một ứng suất lớn hơn sức bền của vật liệu bị gia công. Ban đầu do tác dụng của lực P dao bắt đầu nén vật liệu gia công theo mặt trước của dụng cụ cắt. Lực P này yêu cầu phải đủ lớn để tạo ra trong vật liệu gia công một ứng suất lớn hơn sức bền của nó - tức là lớn hơn khả năng liên kết của các tinh thể kim loại, đồng thời phải thắng được lực cản do ma sát trong quá trình gia công (ma sát giữa các tinh thể trượt lên nhau, ma sát giữa phoi và dao, ma sát giữa dao và vật liệu gia công). Khi dao tiếp tục chuyển động tương đối trong vật liệu gia công phát sinh biến dạng đàn hồi, biến dạng này nhanh chóng chuyển sang biến dạng dẻo và một lớp

phoi có chiều dày t_p được hình thành từ lớp kim loại bị cắt có chiều dày t , di chuyển dọc theo mặt trước của dao (Hình 1). Để hình thành được phoi trước đó lớp kim loại bị cắt đã trải qua một quá trình biến dạng nhất định, nghĩa là giữa lớp kim loại bị cắt và phoi luôn có một khu vực biến dạng. Khu vực này có thể gọi là miền tạo phoi. Miền tạo phoi được giới hạn bởi miền AOE trong đó: đường OA là đường phát sinh những biến dạng dẻo đầu tiên, đường OE là đường kết thúc những biến dạng dẻo, đường AE nối liền khu vực chưa biến dạng của kim loại và phoi. Miền tạo phoi AOE sẽ di chuyển cùng dao trong quá trình cắt. Miền này được sơ đồ hóa như Hình 1. Trên miền này có những mặt trượt OA, OB, OC, OD, OE khi hình thành phoi vật liệu gia công trượt trên những mặt đó.



Hình 1. Sơ đồ tạo phoi khi gia công [13]

Cách xác định hệ số co rút phoi

Hệ số co rút phoi thực hiện bằng cách cân trọng lượng phoi và được tính theo công thức:

$$K_p = \frac{1000.Q}{P.l_i.S.t} \quad (1)$$

Trong đó: Q : Là trọng lượng của phoi (gram) P : Khối lượng riêng của vật liệu (g/cm^3); l_i : Chiều dài phoi (mm); S : Lượng chạy dao (mm/vòng); t : Chiều sâu cắt (mm)

2.1.2. Vật liệu thí nghiệm

Nghiên cứu sử dụng vật liệu gia công là hợp kim nhôm A6061, vật liệu này có những đặc điểm sau: tính chống ăn mòn tốt, nhiệt độ nóng chảy và độ cứng thấp. Ủ đồng đều ở nhiệt độ 5400°C trong 5 giờ. Nung nóng thổi đúc trước khi ép tới 5000°C và được làm nguội trong không khí ngay khi ép. Tính chất cơ học bao gồm: độ bền kéo 291 MPa, giới hạn chảy quy ước 241MPa, độ cứng của nhôm là 97HB.

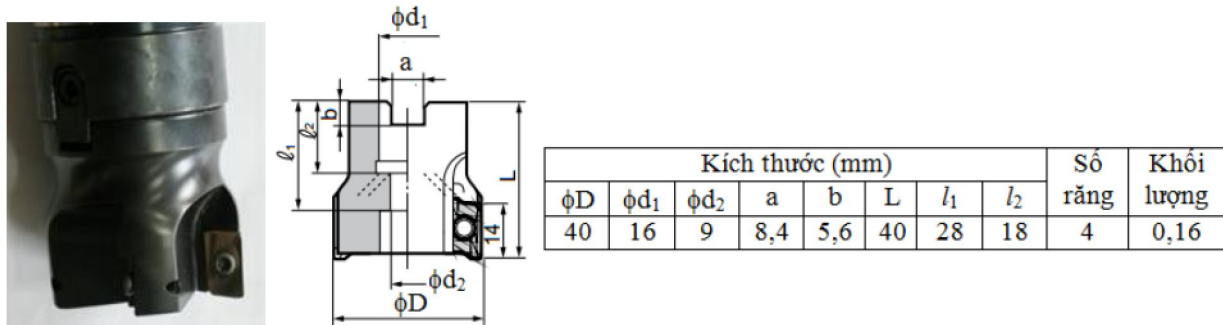
Bảng 1. Thành phần hóa học của nhôm A6061 [12]

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

2.1.3. Thông số hình học của dao

Thực nghiệm dùng dao phay mặt đầu có đường kính 40 mm, sử dụng một mảnh hợp kim cứng của hãng THREADEX USA với mã sản phẩm APMT1604PDTR TC300, vật liệu lưỡi cắt là hợp kim cứng có độ cứng 35 đến 45 HRC (Hình 2). Trong quá trình phay cao tốc

dụng cụ cắt không sử dụng dung dịch bôi trơn làm mát. Lưỡi cắt có góc trước là 5° và góc sau của dụng cụ cắt là 10° .



Hình 2. Thông số dụng cụ cắt

2.1.4. Thiết bị thí nghiệm và dụng cụ đo

Thực nghiệm được thực hiện trên máy phay CNC ba trục VMC0641 (hình 3). Đặc tính cơ bản của máy bao gồm: Kích thước bàn máy: 700 x 410mm. Tải trọng cho phép lớn nhất: 300 kg. Kích thước khe T: 18 x 3mm. Hành trình bàn làm việc lớn nhất trục X: 610mm. Hành trình bàn làm việc lớn nhất trục Y: 410mm. Hành trình trục Z: 410mm. Khoảng cách lớn nhất từ đầu trục chính đến mặt bàn máy: 540mm. Khoảng cách nhỏ nhất từ đầu trục chính đến mặt bàn máy: 130mm. Độ côn trục chính BT40. Phạm vi tốc độ trục chính: 60 đến 8.000 vòng/phút. Công suất động cơ chính: 7,5/11 KW.



Hình 3. Máy phay CNC VMC0640

Các thiết bị đo: Thiết bị đo khối lượng Sartorius của Đức với các thông số sau: Khả năng cân lớn nhất 220g, độ chính xác 10^{-4} g, đĩa cân làm bằng thép không gỉ, nguồn điện đầu vào 220V/50Hz (hình 4).

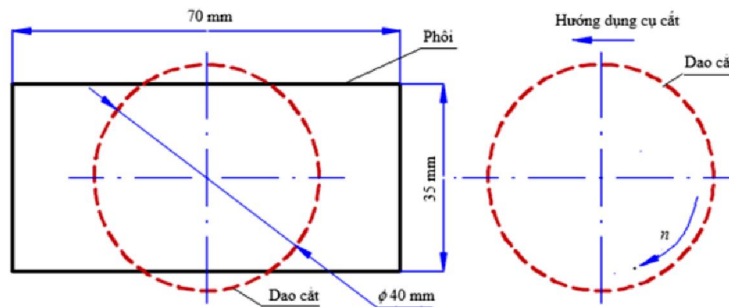


Hình 4. Thiết bị đo khối lượng

Ngoài ra đo chiều dài còn sử dụng: Pame, thước cặp, sợi chỉ... Thiết bị đo nhám bề mặt Mitutoyo SJ - 400.

2.2. Phương pháp thực nghiệm

Từ nghiên cứu lý thuyết về quá trình cắt và việc phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình phay như: biên dạng phoi, lực cắt, nhiệt cắt..., khả năng làm việc và tuổi thọ của dụng cụ cắt. Đồng thời căn cứ vào một số điều kiện khác như: Công suất cắt của máy, điều kiện bôi trơn, rung động...



Hình 5. Sơ đồ phay đối xứng khi phay cao tốc hợp kim nhôm A6061

Thông qua việc tham khảo các điều kiện thực nghiệm từ nghiên cứu trước đó và thông qua việc thí nghiệm thử đồng thời căn cứ giới hạn mà thiết bị có thể gia công tốt nhất, tác giả lựa chọn các thông số cắt khi phay hợp kim nhôm A6061 như sau: Vận tốc cắt (V) được chọn trong khoảng: 376 ÷ 659 m/phút. Chiều sâu cắt (t) từ 0,5 ÷ 2,25 mm. Bước tiến (S) nằm trong khoảng: 100 ÷ 500 mm/phút. Thực nghiệm quá trình phay cao tốc hợp kim nhôm A6061 sử dụng dao phay mặt đầu và phương pháp phay đối xứng, sơ đồ phay được mô hình hóa thể hiện trên Hình 5.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của vận tốc cắt đến hệ số co rút phoi và độ nhám bề mặt

Thực nghiệm ảnh hưởng của V tới hệ số co rút phoi K và nhám bề mặt R_a khi phay hợp kim nhôm A6061. Gia công được thực hiện ở điều kiện không sử dụng dung dịch trơn nguội, giữ cố định $t = 1\text{mm}$, $S = 250\text{mm/phút}$ đồng thời thay đổi các giá trị khác nhau của V . Thông số và kết quả thực nghiệm cho trên Bảng 2.

Bảng 2. Ảnh hưởng của vận tốc cắt đến K và R_a

S(mm/phút)	t(mm)	V(m/phút)	K	R_a
250	1,0	376	1,78	1,66
		419	1,75	1,62
		471	1,73	1,57
		565	1,7	1,51
		659	1,68	1,37

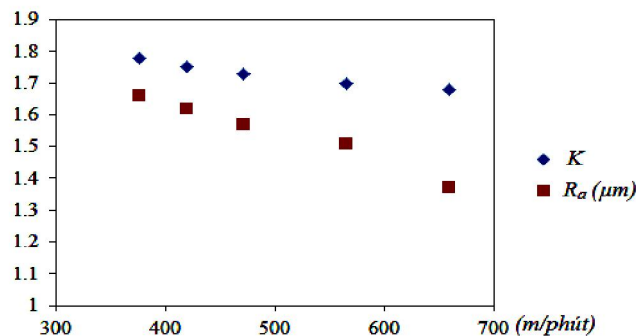
Khi thay đổi V hình thái của phoi hình thành cũng thay đổi cụ thể hình thái hình học phoi thu được ở tốc độ cắt 376m/phút (hình 6) có dạng mảnh, độ xoắn nhỏ. Khi ở tốc độ cắt 659m/phút phoi thu được có phoi cong nhiều hơn, bề rộng phoi cũng tăng và mặt không tiếp xúc của phoi với dao bị gợn nhiều hơn.



a)

b)

Hình 6. Hình dạng phoi thu được khi thay đổi vận tốc cắt a) $V = 419$ m/phút b) $V = 659$ m/phút



Hình 7. Ảnh hưởng của vận tốc cắt đến K và R_a

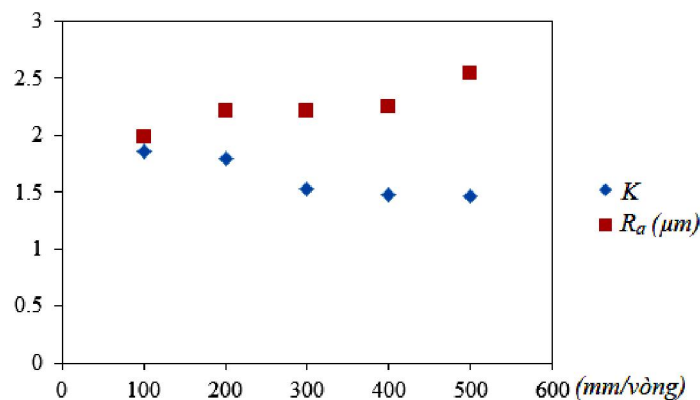
Mặt khác khi đo hệ số co rút phoi và độ nhám bề mặt, mức độ giảm của K nhỏ hơn mức độ giảm của R_a (Hình 7). Kết quả này được giải thích như sau: Khi gia công hợp kim nhôm A6061 do tính chất vật lý của nhôm dẫn nhiệt tốt và có độ cứng cao để quá trình gia công thuận lợi. Khi cùng điều kiện cắt, tốc độ cắt tăng làm mất đi hiện tượng lẹo dao, vùng tiếp xúc của dao và phôi khi cắt giảm do đó hệ số co rút phoi và độ nhám bề mặt chi tiết gia công giảm. Mặt khác tốc độ cắt ảnh hưởng đến nhiệt cắt và lực cắt trong khu vực cắt chính. Khi tăng tốc độ cắt sẽ làm cho quá trình nhiệt tăng nhanh, nhiệt gia tăng như vậy làm cho độ bền của vật liệu giảm đi và lực cắt cũng giảm, mặt khác tốc độ cắt tăng nhanh dẫn đến sự tiếp xúc giữa dao- phôi, dao và phôi xảy ra trong thời gian ngắn điều đó làm cho các tinh thể trong vùng này bị ảnh hưởng dẫn đến hiện tượng biến cứng bề mặt [13].

3.2. Ảnh hưởng của lượng chạy dao đến hệ số co rút phoi và độ nhám bề mặt

Thực nghiệm được thực hiện trong điều kiện không sử dụng dung dịch làm mát, chiều sâu cắt và vận tốc cắt được giữ cố định tương ứng là 1mm, 471m/phút. Lượng chạy dao thay đổi tương ứng từ 100 đến 500 mm/phút. Bảng thông số cắt và kết quả đo thể hiện trên Bảng 3.

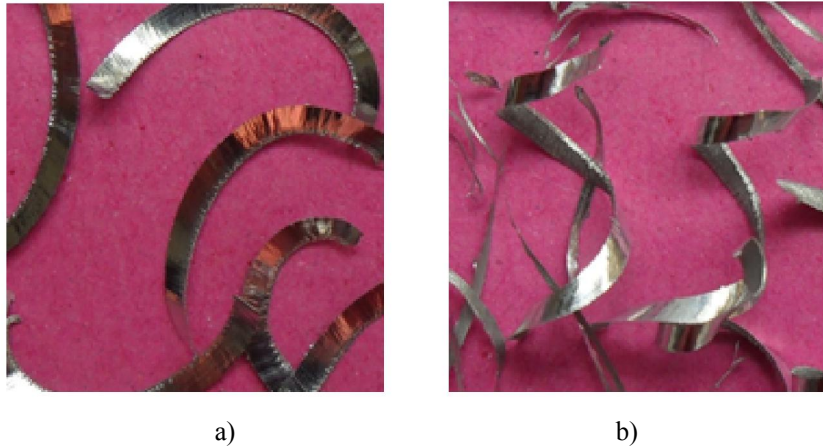
Bảng 3. Ảnh hưởng của lượng chạy dao đến K và R_a

V(m/phút)	t (mm)	S (mm/phút)	K	Ra
471	1,0	100	1,86	1,98
		200	1,797	2,21
		300	1,531	2,22
		400	1,481	2,25
		500	1,472	2,55



Hình 8. Ảnh hưởng của lượng chạy dao đến K và R_a

Lượng chạy dao ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng bề mặt gia công, khi tăng lượng chạy dao thì chất lượng bề mặt giảm là vì khi tăng lượng chạy dao tức chiều dày cắt tăng, lực cắt, nhiệt cắt, rung động tăng điều đó làm giảm chất lượng bề mặt gia công (hình 8).



Hình 9. Hình dạng phoi thu được khi thay đổi lượng chạy dao a) $S = 100$ (mm/phút), b) $S = 500$ (mm/phút)

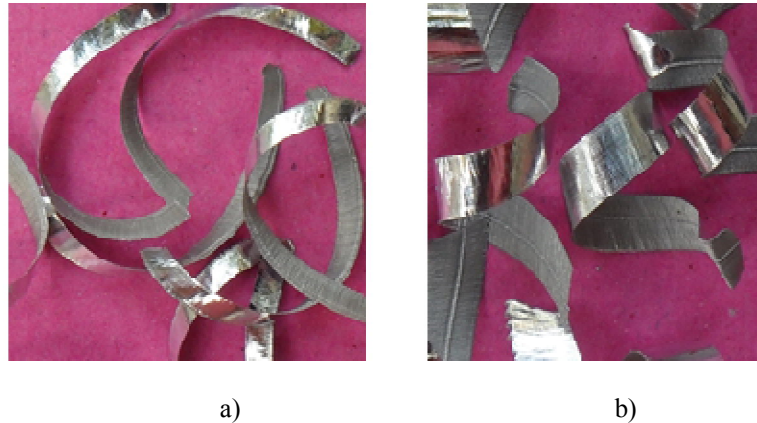
Hình dạng phoi thu được khi phay hợp kim nhôm A6061 với các lượng chạy dao khác nhau cho trên hình 9. Lượng chạy dao thấp ($S = 100$ mm/phút) phoi có dạng mảnh, chiều dày phoi và chiều rộng phoi nhỏ, phoi không bị cong nhiều. Ngược lại khi lượng chạy dao đạt 500 mm/phút phoi có chiều dày lớn, độ xoắn nhiều hơn, ngoài ra do lượng chạy dao tăng cũng thì hiện tượng dao xuấ hiện và lúc đó lưỡi dao bị cắt lại tạo ra những bavias mỏng kèm theo phoi. Hệ số co rút phoi giảm dần khi tăng lượng chạy dao vì khối lượng phoi tăng lên nhưng chiều dài phoi tăng không đáng kể. Do có sự biến dạng không đều khi lượng chạy dao tăng vì sự tiếp xúc giữa mặt trước của dao với phoi tăng lớp phoi càng gần mặt trước của dao càng chịu biến dạng lớn như vậy trong cùng điều kiện cắt phoi mỏng có hệ số co rút phoi lớn hơn phoi dày [13]. Ứng với hệ số co rút phoi giảm thì độ nhám bề mặt R_a lại tăng lên. Điều này giải thích rằng khi lượng chạy dao càng lớn thì chiều dày cắt càng tăng do vậy diện tích tiếp xúc giữa dao và phoi cũng tăng lên, mặt khác điều kiện cắt khác vẫn giữ nguyên nên việc bóc tách kim loại ra khỏi bề mặt kim loại sẽ phức tạp hơn dẫn đến việc xuất hiện sự cào xước trên bề mặt chi tiết gia công.

Bảng 4. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt đến K và R_a

V (mm)	S (mm/phút)	t (mm)	K	R_a
565	250	0,5	1,75	0,84
		1,25	1,707	1,05
		1,5	1,681	1,37
		2	1,598	1,44
		2,25	1.583	1,51

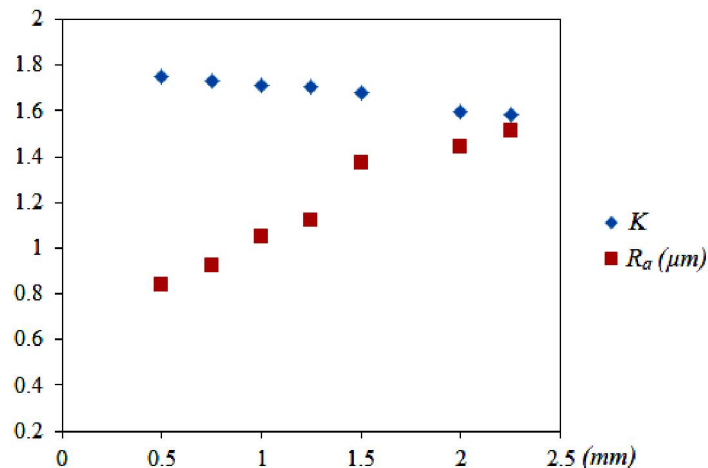
3.3. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt đến hệ số co rút phoi và độ nhám bề mặt

Thực nghiệm ảnh hưởng của chiều sâu cắt đến hệ số co rút phoi và chất lượng bề mặt gia công được khi giữ nguyên tốc độ cắt 565m/phút, lượng chạy dao 250mm/phút với điều kiện cắt khô. Chiều sâu cắt thay đổi từ 0,5mm đến 2,5mm. Bảng thông số ảnh hưởng của chiều sâu cắt đến K và R_a thể hiện như trên Bảng 4.



Hình 10. Phoi tạo thành khi thay đổi chiều sâu cắt a) $t=1,25$ mm và b) $t=2,5$ mm.

Hình dạng phoi thu được như Hình 10 cho thấy khi chiều sâu cắt tăng, chiều rộng của phoi và độ xoắn của phoi cũng tăng lên, điều này cho thấy sự biến dạng lớp kim loại đã chịu biến dạng nhiều hơn cùng với đó lực cắt cũng như nhiệt cắt cần thiết tăng lên. Hệ số co rút phoi giảm khi chiều sâu cắt tăng, vì chiều sâu tăng diện tích phoi cũng tăng làm cho khả năng biến dạng của phoi giảm (Hình 11).



Hình 11. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt đến K và R_a

Độ nhám bề mặt tăng nhanh khi tăng chiều sâu cắt do xuất hiện nhiệt và rung động trong quá trình cắt đồng thời với việc đó tính cắt của hợp kim nhôm A6061 cũng bị ảnh hưởng không có lợi cho quá trình cắt. Bên cạnh đó việc tăng chiều sâu cắt cũng làm cho phần tiếp xúc giữa phoi và mặt trước của dao tăng, quá trình biến dạng xảy ra khó khăn hơn trong khi các điều kiện cắt không thay đổi.

4. KẾT LUẬN

Khi phay hợp kim nhôm A6061 giữ nguyên điều kiện cắt, khảo sát thay đổi vận tốc cắt, chiều sâu cắt, lượng chạy dao thì hệ số co rút phoi và độ nhám bề mặt thay đổi như sau:

- Khi thay đổi vận tốc cắt trong vùng tốc độ từ 356 m/phút đến 659 m/phút khi các điều kiện cắt giữ nguyên, thì hệ số co rút phoi và độ nhám bề mặt giảm.

- Lượng chạy dao và chiều sâu cắt tăng thì hệ số co rút phoi giảm, độ nhám bề mặt tăng.

Kết quả nghiên cứu giúp các nhà công nghệ điều chỉnh các thông số công nghệ phù hợp để cho năng suất và chất lượng chi tiết gia công là lớn nhất khi gia công hợp kim nhôm A6061.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trung tâm Nghiên cứu Ứng dụng Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên, đề tài mã số UTEHY.T016.P1718.02

DANH MỤC DANH PHÁP/KÝ HIỆU

K	: Hệ số co rút phoi
R_a	: Độ nhám bề mặt
V	: Vận tốc cắt (m/phút)
S	: Lượng chạy dao (mm/phút)
t	: Chiều sâu cắt (mm)

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Ekinovi and J. Kopa, 2002. A contribution to the understanding of chip formation mechanism in high-speed cutting of hardened steel. *Achiev. Mech. Mater. Eng.*, pp. 1–4.
- [2]. A. Rathi, A. Mahor, R. Ranjan, A. Gajbhiye, A. Rehman, and C. M. Krishna, 2014. Characterization of Chip Morphology for Aluminum Metal Matrix Composites in End Milling Machining. *Univers. J. Mech. Eng.*, vol. 2, no. 7, pp. 240–247.
- [3]. Ş. Aykut, E. Bağcı, A. Kentli, and O. Yazicioğlu, 2007. Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool. *Mater. Des.*, vol. 28, no. 6, pp. 1880–1888.
- [4]. V. Wagner, M. Baili, and G. Desein, 2014. The relationship between the cutting speed, tool wear, and chip formation during Ti-5553 dry cutting. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 76, no. 5–8, pp. 893–912.
- [5]. P. Chevrier, A. Tidu, B. Bolle, P. Cezard, and J. P. Tinnes, 2003. Investigation of surface integrity in high speed end milling of a low alloyed steel. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 11, pp. 1135–1142.
- [6]. S. Zhang, J. Li, X. Zhu, and H. Lv, 2013. Saw-tooth chip formation and its effect on cutting force fluctuation in turning of Inconel 718. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 14, no. 6, pp. 957–963.
- [7]. C. Felho, B. Karpuschewski, and J. Kundrák, 2015. Surface roughness modelling in face milling. *Procedia CIRP*, vol. 31, pp. 136–141.
- [8]. X. Cui, J. Zhao, C. Jia, and Y. Zhou, 2012. Surface roughness and chip formation in high-speed face milling AISI H13 steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 1–4, pp. 1–13.
- [9]. D. K. Baek, T. J. Ko, and H. S. Kim, 2001. Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, no. 3, pp. 451–462.

[10]. O. S. Joshua, M. O. David, and I. O. Sikiru, 2015. Experimental Investigation of Cutting Parameters on Surface Roughness Prediction during End Milling of Aluminium 6061 under MQL (Minimum Quantity Lubrication). *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, vol. 5, no. 1, pp. 1–13.

[11]. M. T. Hayajneh, M. S. Tahat, and J. Bluhm, 2007. A Study of the Effects of Machining Parameters on the Surface Roughness in the End-Milling Process. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-5.

[12]. Swan MS, 2012. Incorporation of a general strain-to-failure fracture criterion into a stress-based elasticity model through a time-to-failure softening mechanism. *M.Sc. Thesis in Mechanical Engineering*, University of Utah, USA.

[13]. Bành Tiến Long, Trần Thế Lục, Trần Sỹ Túy, 2013. *Nguyên lý gia công vật liệu*. NXB KHKT, Hà Nội.