

Ảnh Hưởng Của Chế Độ Cắt Đến Các Đặc Tính Của Phoi Và Lực Cắt Khi Phay Cao Tốc Hợp Kim Nhôm A6061

The Effects of Cutting Parameters on the Characteristics of Chip and Cutting Force in High-Speed Milling of A6061 Aluminum Alloy

Phạm Thị Hoa¹, Nguyễn Đức Toàn^{2*}

¹ Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Hưng Yên - Dân Tiến, Khoái Châu, Hưng Yên

² Trường Đại học Bách khoa Hà Nội – Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

Đến Tòa soạn: 21-7-2017; chấp nhận đăng: 25-01-2018

Tóm tắt

Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ cắt (vận tốc cắt, chiều sâu cắt) đến các đặc tính của phoi và lực cắt khi phay cao tốc hợp kim nhôm A6061 sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn với phần mềm thương mại ABAQUS/Explicit. Một mô hình phần tử hữu hạn mô phỏng quá trình cắt được xây dựng dựa trên mô hình phá hủy Bao-Wierzbicki (B-W) mở rộng từ tiêu chí phá hủy Morh-Coulomb. Tính chính xác của mô hình mô phỏng được xác thực thông qua so sánh hình thái học của phoi thu được nhờ mô phỏng và ảnh chụp SEM. Sau đó ảnh hưởng của các thông số công nghệ hình thái học của phoi, hệ số co rút phoi và lực cắt khi gia công sẽ được khảo sát. Kết quả mô phỏng cho thấy hình thái học là phụ thuộc lớn vào tốc độ cắt. Nghiên cứu cũng đề xuất một số công thức thể hiện mối quan hệ giữa chế độ cắt đến hệ số co rút phoi và lực cắt.

Từ khóa: Hệ số co rút phoi, mô hình Bao-Wierzbicki, hợp kim nhôm A6061, lực cắt.

Abstract:

This paper studied the effects of cutting parameters (cutting speed, cutting depth, feed-rate) on the characteristics of chip and cutting force in high-speed milling of A6061 aluminum alloy using FEM with ABAQUS/Explicit commercial software. First, a FE model was created based on the Bao-Wierzbicki (B-W) material fracture model, which was extended from the Morh-Coulomb criteria. The simulation model was verified by comparing the morphologies of simulated chip and that obtained by SEM. Then, the effects of cutting parameters on the chip morphology, chip shrinkage coefficient and cutting force were investigated. The simulation results showed that the chip morphology significantly depends on the cutting speed. The explicit formulae, which reflect the relationship between cutting parameters on chip chip shrinkage coefficient and cutting force, were finally proposed.

Keywords: chip chip shrinkage coefficient, Bao-Wierzbicki model, A6061 aluminum alloy, cutting force.

1. Giới thiệu

So với gia công truyền thống thì gia công cao tốc có ưu điểm làm giảm thời gian gia công đến 90% và giảm chi phí gia công đến 50%. Tốc độ bóc tách kim loại nhanh, lực cắt thấp, chất lượng bề mặt gia công tốt [1], gia công được vật liệu có độ cứng cao, chi tiết thành mỏng và không cần tưới nguội [2]. Khi cắt ở tốc độ cao thì phoi di chuyển ra khỏi vùng cắt nhanh hơn làm giảm đáng kể nhiệt cắt vì trong quá trình gia công nhiệt sẽ truyền chủ yếu vào phoi[3]. Ngày nay gia công cao tốc được ứng dụng chủ yếu trong công nghiệp khuôn mẫu, công nghiệp ô tô, công nghiệp hàng không, công nghiệp nhẹ... Sự khác biệt của gia công cao tốc so với gia công truyền thống là gia công cao tốc có: vận tốc cắt cao, lượng

chạy dao cao và năng suất gia công lớn [4]. Một số nghiên cứu về gia công cao tốc như: phay cao tốc thép cứng [5], thép AISI H13 [1], [6], Inconel 718 [7], hợp kim nhôm 7475 [8], Ti6Al4V[9] các nghiên cứu đã đánh giá chất lượng bề mặt gia công và lực cắt cũng như tuổi bền dụng cụ cắt, về cơ chế mài mòn dụng cụ cắt khi phay gia công cao tốc. Một số các nhà nghiên cứu cũng đã tìm hiểu về cơ chế sự hình thành phoi và đặc điểm của phoi liên quan đến điều kiện cắt khi sử dụng phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn. Các nghiên cứu sử dụng mô hình Johnson-Cook (J-C) [10], mô hình J-C cùng với sự kết hợp các tiêu chí vùng ứng suất Von-Mises, biến dạng dẻo tương đương, tốc độ biến dạng và nhiệt độ [11]. Một số tác giả đã sử dụng các mô hình phá hủy khác nhau để mô phỏng quá trình gia công vật liệu chẳng hạn như các mô hình biến dạng phá hủy [12], [13]. Mô hình của Wilkins [14], mô hình sửa đổi của Cockcroft-Latham [15]–[17], hoặc các mô hình

* Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 988 693 047

Email: toan.nguyenduc@hust.edu.vn

nguồn, tất cả các mô hình có thể dự đoán về lực cắt, chiều dày phoi, ứng suất, biến dạng và nhiệt độ... Mô hình Bao-Wierzbicki (B-W) thường xuyên được sử dụng với mục đích để kiểm tra đặc tính của vật liệu [18]–[21]. Gần đây các nghiên cứu của Li và các đồng nghiệp [22], [23] đã khảo sát lực cắt và chiều dày phoi trong suốt quá trình phay nhôm Ti6Al4V và vật liệu Inconel 718 với việc sử dụng mô hình J-C để xác định ứng suất chảy sinh ra trong quá trình gia công. Như vậy việc sử dụng mô hình mô phỏng theo phương pháp phần tử hữu hạn giúp cho việc mô tả quá trình cắt ngày càng chính xác. Sự đa dạng về kết quả đầu ra của quá trình gia công kim loại như lực cắt, ứng suất, nhiệt, hình dáng phoi... có thể dự đoán bằng mô phỏng theo phương pháp phần tử hữu hạn mà không cần đến những thực nghiệm tương ứng [24]–[30]. Ở Việt Nam việc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn vào mô phỏng quá trình gia công vẫn còn rất hạn chế và chưa có nghiên cứu nào sử dụng mô phỏng theo phương pháp phần tử hữu hạn vào mô tả và dự đoán các hiện tượng xảy ra trong quá trình phay cao tốc.

Nghiên cứu này sử dụng mô hình B-W sửa đổi từ mô hình Mohr-Coulomb để mô phỏng và kiểm chứng quá trình hình thành phoi khi phay ở tốc độ cao và xây dựng phương trình phụ thuộc của các thông số công nghệ đến hệ số co rút phoi và lực cắt khi mô phỏng quá trình phay cao tốc hợp kim nhôm A6061.

2. Thiết kế mô phỏng và thực nghiệm quá trình tạo phoi

2.1 Mô hình mô phỏng

Chỉ tiêu phá hủy của mô hình B-W sửa đổi theo mô hình Mohr-Coulomb là một chỉ tiêu phá hủy được xem xét với một mục tiêu mô tả chỉ tiêu phá hủy của chất rắn đồng chất và đẳng hướng. Mô hình sửa đổi này tính đến ảnh hưởng của góc Lode- góc này có vai trò quan trọng trong việc phá hủy dẻo của kim loại. Đồng thời mô hình xét tới mối quan hệ của hai tham số: chỉ số trạng thái ứng suất và góc Lode. Mô hình sửa đổi B-W được đưa ra dưới dạng sau [31], [32]:

$$D = \int_0^{\epsilon_f} \frac{d\bar{\epsilon}_f}{f(\eta, \bar{\theta})} \tag{1}$$

Trong đó $\bar{\epsilon}_f$ là biến dạng phá hủy tương đương, $\eta = \sigma_H / \bar{\sigma}$ là chỉ số trạng thái ứng suất, σ_H là ứng suất tương đương, $\bar{\theta}$ là tham số góc Lode và được định nghĩa:

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos\left(\left(\frac{r}{\bar{\sigma}}\right)^3\right) \tag{2}$$

Trong đó r là ba giá trị bất biến của tenxo ứng suất.

$$r = \left[\frac{27}{2} (\sigma_1 - \sigma_H)(\sigma_2 - \sigma_H)(\sigma_3 - \sigma_H) \right]^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

Bảng 1. Thông số phá hủy vật liệu của nhôm A6061 [32]

A(MPa)	n	C1	C2(MPa)	C3
438	0,07	0,06	288	0,93

Công thức biến dạng phá hủy được viết là:

$$\bar{\epsilon}_f(\eta, \bar{\theta}) = \left\{ \frac{A}{C_2} \left[C_3 + \frac{\sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}} (1 - C_3) \left(\sec\left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6}\right) - 1 \right) \right] \right. \tag{4}$$

$$\left. \times \left[\sqrt{\frac{1 + C_1^2}{3}} \cos\left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6}\right) + C_1 \left(\eta + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6}\right) \right) \right] \right\}^{\frac{1}{n}}$$

Để đơn giản hóa mối quan hệ giữa η và góc Lode là:

$$-\frac{27}{2} \eta(\eta^2 - \frac{1}{3}) = \cos(3\theta) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \bar{\theta}\right) \tag{5}$$

Lúc này biến dạng phá hủy được viết lại như sau [33]:

$$\bar{\epsilon}_f(\eta) = \left\{ \frac{A}{C_2} f_3 \left[\sqrt{\frac{1 + C_1^2}{3}} f_1 + C_1 \left(\eta + \frac{f_2}{3} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \tag{6}$$

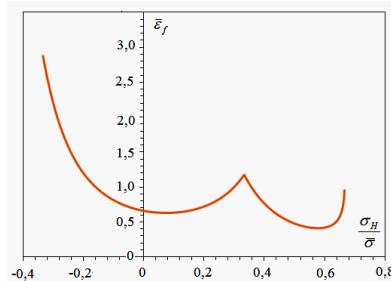
Trong đó các thông số f được xác định như sau:

$$f_1 = \cos\left\{ \frac{1}{3} \arcsin\left[-\frac{27}{2} \eta(\eta^2 - \frac{1}{3}) \right] \right\} \tag{7}$$

$$f_2 = \sin\left\{ \frac{1}{3} \arcsin\left[-\frac{27}{2} \eta(\eta^2 - \frac{1}{3}) \right] \right\} \tag{8}$$

$$f_3 = C_3 + \frac{\sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}} (1 - C_3) \left(\frac{1}{f_1} - 1 \right) \tag{9}$$

Với A và C₁, C₂, C₃ là các tham số liên quan đến chức năng chỉ số biến dạng phá hủy và được xác định bằng thực nghiệm.



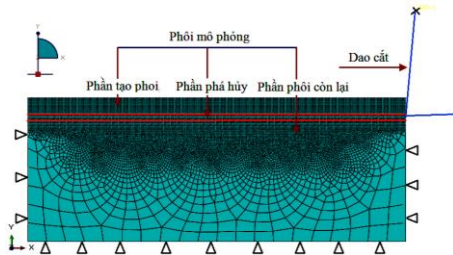
Hình 1. Đường cong phá hủy của hợp kim nhôm A6061 dựa trên công thức (6).

Trên Hình 2 mô tả dạng đường cong quỹ tích phá hủy của mô hình phá hủy B-W từ mô hình sửa đổi (MM-C) cho bởi phương trình (6) của hợp kim nhôm A6061 ứng với chỉ số trạng thái ứng suất.

Quỹ tích phá hủy ứng với chỉ số trạng thái ứng suất η nằm trong khoảng $1/\sqrt{3}$ đến $2/3$ thì chỉ số trạng thái ứng suất là khoảng không đổi và biến dạng tương đương tới phá hủy không vượt quá 0,577. Vùng chỉ số trạng thái ứng suất 0 đến $1/3$ tham số biến dạng tương đương tăng đến giá trị 0,414 thì bắt đầu trạng thái phá hủy.

2.2 Thiết kế mô phỏng

Quá trình hình thành phoi khi gia công hợp kim nhôm A6061 được mô phỏng bằng phần mềm thương mại Abaqus/Explicit 6.13. Điều kiện biên và phần tử lưới được thiết lập cho mô hình mô phỏng 2D được thể hiện trên Hình 2. Trong đó phôi cắt được mô hình hóa bằng 4 nút song tuyến (CPE4R), dụng cụ cắt được coi là phần tử cứng.

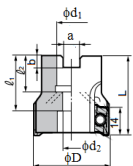


Hình 2. Sơ đồ định vị và phần tử lưới khi mô phỏng.

Phôi mô phỏng được phân chia thành 3 phần được như sau: Phần tạo phoi, phần phá hủy và phần phôi còn lại. Phần phá hủy được mô hình hóa bằng ba lớp phần tử với tổng chiều dày lớn hơn bán kính dụng cụ cắt. Lớp phoi được hình thành, biến dạng chủ yếu từ lớp phoi chưa cắt (lớp chiều dày cắt) và một phần được sinh ra từ các phần tử trong lớp phá hủy, phần còn lại sẽ bị phá hủy hoặc bị xóa như Hình 2. Dụng cụ cắt khi mô phỏng có góc trước là 5° và góc sau là 10° .

2.3 Thiết kế thực nghiệm

Dao phay mặt đầu dùng cho thực nghiệm có đường kính 40 mm, dụng cụ cắt không sử dụng dung dịch bôi trơn làm mát. Lưỡi cắt có góc trước và góc sau của dụng cụ cắt tương ứng là 5° và 10° .

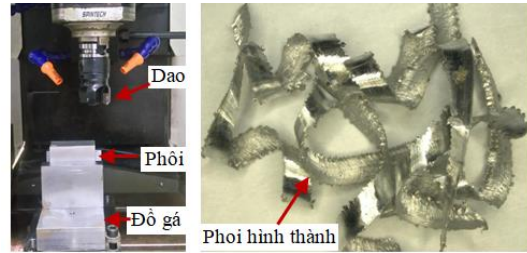


Kích thước (mm)								Số răng	Khối lượng
ϕD	ϕd_1	ϕd_2	a	b	L	l_1	l_2		
40	16	9	8,4	5,6	40	28	18	4	0,16

Hình 3. Thông số của dụng cụ cắt cho thực nghiệm

Thực nghiệm quá trình tạo phoi thực hiện trên máy

CNC MC 500, sơ đồ gá đặt khi gia công và phôi hình thành được cho trên Hình 3.

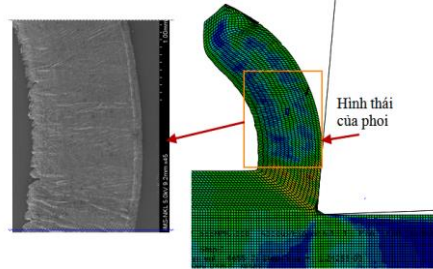


Hình 4. Mô hình thực nghiệm và phôi hình thành

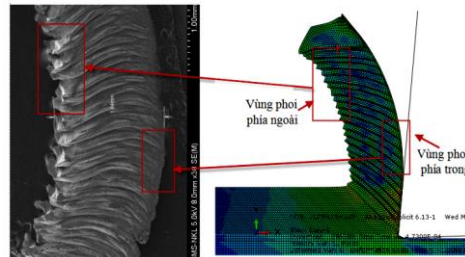
3. Kết quả và thảo luận

3.1 So sánh hình thái hình học của phoi giữa mô phỏng và thực nghiệm khi gia công hợp kim nhôm A6061

Hình thái hình học của phoi tạo thành phụ thuộc vào vận tốc cắt và chiều sâu cắt. Khi mô phỏng hình thái hình học của phoi ở tốc độ cắt thấp phôi hình thành dạng phoi dây. Nghiên cứu đã so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm ở vận tốc cắt $V = 565$ m/phút và chiều sâu cắt $t = 0,5$ mm trên Hình 5a. Quan sát thấy rằng hình thái hình học của phoi ở vùng tốc độ cắt 565 m/phút có sự tương đồng giữa mô phỏng và thực nghiệm, phôi hình thành là dạng phoi dây. Hình thái hình học của phoi tạo thành khi phay cao tốc hợp kim nhôm A6061 là phoi phân lớp. Để kiểm chứng giữa mô phỏng và thực nghiệm hình thái phoi ở tốc độ cắt cao, nghiên cứu cũng đã thực hiện mô phỏng hình thái của phoi ở tốc độ cắt $V = 1256$ m/phút và chiều sâu cắt $t = 1,5$ mm. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy sự phân lớp trên phoi có sự tương đồng nhau.



a) Phôi hình thành ở vận tốc cắt 565 m/phút



b) Phôi hình thành ở vận tốc cắt 1256 m/phút

Hình 5. Hình thái hình học của phoi tạo thành khi phay hợp kim nhôm A6061 giữa mô phỏng và thực nghiệm.

Trên Hình 5b thể hiện hình thái hình học của phoi và so sánh thấy sự tương đồng về hình dáng và sự phân lớp trên bề mặt phoi. Sự phân lớp thể hiện rõ ở mặt phía ngoài của phoi thấy rõ các lớp hình thành. Mặt phía trong phoi lại có chịu sức ép và ma sát nên sự biến dạng không thành sự phân lớp như Hình 5b.

3.2 Ảnh hưởng của thông số công nghệ đến hệ số co rút phoi (K_s) khi mô phỏng quá trình phay cao tốc hợp kim nhôm A6061

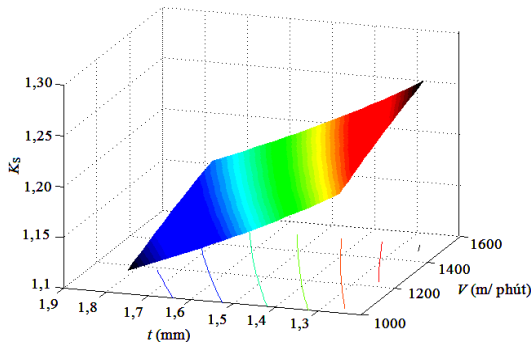
Để dự đoán ảnh hưởng của vận tốc cắt và chiều sâu cắt đến K_s ở vùng tốc độ cao mô hình toán học của hệ số co rút phoi phụ thuộc vào V, t khi mô phỏng quá trình phay cao tốc hợp kim nhôm A6061 có dạng như sau:

$$K_s = p_1 \cdot V^{p_2} \cdot t^{p_3} \tag{10}$$

Trong đó K_s là hệ số co rút phoi, p₁, p₂, p₃ là các tham số phụ thuộc; V, t là các thông số công nghệ được xác định như trên Bảng 2.

Phân tích phương sai cho thấy F lý thuyết bằng 0,00779 nhỏ hơn 0,5 [34] (bảng 4) như vậy phương trình hồi quy thu được phù hợp với thực tế. Phương trình phụ thuộc của K_s với các thông số công nghệ V và t lúc này sẽ là:

$$K_s = 0,686 \cdot V^{0,0906} \cdot t^{-0,238} \tag{11}$$



Hình 6. Ảnh hưởng của V, t đến K_s.

Bảng 2. Kết quả của hệ số co rút phoi khi mô phỏng phay cao tốc hợp kim nhôm A6061

TT	V (m/phút)	t (mm)	K _s (N)	ln(V)	ln(t)	ln(K _s)
1	1000	1,25	1,23	6,908	0,223	0,207
2	1512	1,25	1,26	7,321	0,223	0,231
3	1000	1,75	1,12	6,908	0,560	0,113
4	1512	1,75	1,18	7,321	0,560	0,166
5	1256	1,5	1,18	7,136	0,405	0,166
6	1256	1,5	1,19	7,136	0,405	0,174

Trên Hình 6 cho thấy vận tốc cắt tăng làm cho hệ số co rút phoi tăng và chiều sâu cắt tăng thì hệ số co rút phoi giảm. Như vậy tốc độ cắt tăng làm tăng

sự biến dạng của phoi làm cho hệ số co rút phoi tăng. Mặt khác khi chiều sâu cắt tăng thì hệ số co rút phoi giảm vì lúc này chiều dày phoi ít bị biến dạng khi chiều sâu cắt lớn.

Bảng 3. Phân tích hồi quy và phương sai (ANOVA) thông số công nghệ (V, t) ảnh hưởng đến K_s

Các thông số của mô hình hồi quy		R	R ²	Hệ số xác định mẫu điều chỉnh	Sai số chuẩn
		0,980	0,961	0,934	0,010
Phân tích ANOVA	df	SS	MS	F	F lý thuyết
Do hồi quy	2	0,0078	0,0039	36,65	0,0078
Do ngẫu nhiên	3	0,0003	0,0001		
Tổng	5	0,0082			

3.3 Ảnh hưởng của thông số công nghệ đến lực cắt Fs khi mô phỏng hợp kim nhôm A6061.

Để dự đoán ảnh hưởng của lực cắt đến vận tốc cắt và chiều sâu cắt ở vùng tốc độ cao khi mô phỏng quá trình tạo phoi khi phay cao tốc hợp kim nhôm A6061. Mô hình toán học của lực cắt phụ thuộc vào V, t có dạng như sau:

$$F_s = r_1 \cdot V^{r_2} \cdot t^{r_3} \tag{12}$$

Trong đó F_s là lực cắt, r₁, r₂, r₃ là các hàm số phụ thuộc V, t là các thông số công nghệ được xác định như trên Bảng 4.

Bảng 4. Kết quả của lực cắt F_s khi mô phỏng phay cao tốc hợp kim nhôm A6061.

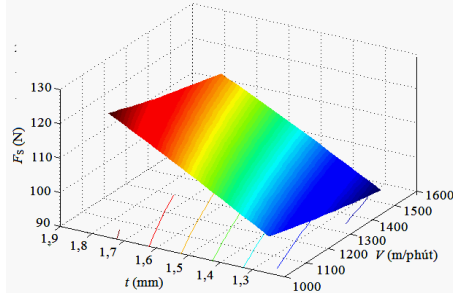
TT	V (m/phút)	t (mm)	F _s (N)	ln(V)	ln(t)	ln(F _s)
1	1000	1,25	97,6	6,91	0,22	4,581
2	1512	1,25	93,6	7,32	0,22	4,539
3	1000	1,75	127,2	6,91	0,56	4,846
4	1512	1,75	112,2	7,32	0,56	4,720
5	1256	1,5	111,7	7,14	0,41	4,716
6	1256	1,5	111,7	7,14	0,41	4,716

Phân tích phương sai cho thấy F lý thuyết bằng 0,0156 nhỏ hơn 0,5 [34] (bảng 5) như vậy phương trình hồi quy thu được phù hợp với thực tế. Phương trình phụ thuộc của F_s tới các thông số công nghệ V và t lúc này sẽ là:

$$F_s = 3357 \cdot V^{-0,1959} \cdot t^{0,6702} \tag{13}$$

Bảng 5. Phân tích hồi quy và phương sai (ANOVA) thông số công nghệ (V, t) ảnh hưởng đến F_s

Các thông số của mô hình hồi quy		R	R ²	Hệ số xác định mẫu điều chỉnh	Sai số chuẩn
		0,968	0,937	0,896	0,036
Phân tích ANOVA	df	SS	MS	F	F lý thuyết
Do hồi quy	2	0,058	0,029	22,49	0,016
Do ngẫu nhiên	3	0,004	0,001		
Tổng	5	0,061			



Hình 7. Ảnh hưởng của V, t đến F_s .

Trên Hình 7 cho thấy vận tốc cắt tăng làm cho hệ số co rút phoi tăng và chiều sâu cắt tăng thì hệ số co rút phoi giảm. Như vậy tốc độ cắt tăng làm tăng sự biến dạng của phoi làm cho hệ số co rút phoi tăng. Mặt khác khi chiều sâu cắt tăng thì hệ số co rút phoi giảm vì lúc này chiều dày phoi ít bị biến dạng khi chiều sâu cắt lớn. Mọi quan hệ giữa lực với các thông số công nghệ (V, t) được cho trên Hình 7. Trên hình cho thấy tốc độ cắt tăng thì lực cắt giảm và chiều sâu cắt tăng thì lực cắt tăng nhanh. Mức độ tăng của chiều sâu cắt là nhiều hơn với vận tốc cắt. Vận tốc cắt tăng làm sinh nhiệt và làm mềm vật liệu từ đó quá trình cắt trở lên dễ dàng hơn dẫn đến lực cắt giảm. Chiều sâu cắt lớn làm tăng công bóc tách vật liệu lực cắt lớn.

4. Kết luận

Hình thái hình học của phoi phụ thuộc vào tốc độ cắt và phoi dây hình thành ở tốc độ cắt thấp và phoi phân đoạn hình thành ở tốc độ cắt cao. Từ kết quả mô phỏng được kiểm chứng bằng thực nghiệm cho kết quả tương đồng nhau.

Mô phỏng và khảo sát ảnh hưởng của chế độ cắt gồm (tốc độ cắt, chiều sâu cắt) đến hệ số co rút phoi và lực cắt. Từ phương trình (11) và (13) cho thấy chiều sâu cắt ảnh hưởng đến hệ số co rút phoi và lực cắt nhiều hơn ảnh hưởng của vận tốc cắt. Tốc độ cắt tăng làm tăng sự biến dạng của phoi làm cho hệ số co rút phoi tăng. Khi chiều sâu cắt tăng thì hệ số co rút phoi giảm vì lúc này chiều dày phoi ít bị biến dạng khi chiều sâu cắt lớn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số “107.02-2016.01”; Và 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.

Tài liệu tham khảo

- [1] X. Cui and J. Zhao, Cutting performance of coated carbide tools in high-speed face milling of AISI H13 hardened steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol* 71 (2014) 1811–1824.
- [2] V. Kauppinen, High-Speed Milling - a New Manufacturing Technology, 4th Int. DAAAM Conf. *Ind. Eng. - Innov. as Compet. Edge SME*, no. April (2004) 131–134.
- [3] P. Lezanski and M. C. Shaw, Tool face temperature in high speed milling, *ASME J. Eng. Ind.*, vol. 112, no. June 1988 (1990) 132–5.
- [4] Z. Wang and M. Rahman, High-Speed Machining, in *Comprehensive Materials Processing*, vol. 11, Elsevier, (1992) 637–643.
- [5] C. Wang, Y. Xie, L. Zheng, Z. Qin, D. Tang, and Y. Song, Research on the Chip Formation Mechanism during the high-speed milling of hardened steel, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 79, (2014) 31–48.
- [6] X. Cui, J. Zhao, C. Jia, and Y. Zhou, Surface roughness and chip formation in high-speed face milling AISI H13 steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 61 (2012) 1–13.
- [7] B. Ramamoorthy and L. Vijayaraghavan, Effect of High Speed Cutting Parameters on the Surface Characteristics of Superalloy Inconel, *Engineering*, III (2010).
- [8] V. D. Calatoru, M. Balazinski, J. R. R. Mayer, H. Paris, and G. L'Espérance, Diffusion wear mechanism during high-speed machining of 7475-T7351 aluminum alloy with carbide end mills, *Wear*, 26 (2008) 1793–1800.
- [9] S. Zhang and J. Li, Tool wear criterion, tool life, and surface roughness during high-speed end milling Ti-6Al-4V alloy, *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, 11 (2010) 587–595.
- [10] T. Data, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates temperatures and pressures, *Eng. Mech* 21(1985).
- [11] M. S. Swan, Incorporation of a general criterion into a stress based plasticity model through a time to failure by, *Thesis Mech. Eng. - Univ. Utah, USA*.(2012).
- [12] O. Article, On predicting chip morphology and phase transformation in hard machining, *Int Adv Manuf Technol*, (2006) 645–654.
- [13] J. Shi and C. R. Liu, Flow stress property of a

- hardened steel at elevated temperatures with tempering effect, *Int. J. Mech. Sci.* 46 (2004) 891–906.
- [14] M. L. Wilkins, R. D. Streit, and J. E. Reaugh, Cumulative-Strain-Damage model of ductile fracture: Simulation and prediction of engineering fracture tests, Lawrence Livermore Natl. Lab(1980) 1–68.
- [15] D. J. L. M.G.Cockcroft, Ductility and the Workability of Metals . *J Inst Metals*, (1968).
- [16] E. Ceretti, M. Lucchi, and T. Altan, FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation, *Juornal Mater. Process. Technol.*, 95 (1999) 17–26.
- [17] J. Lorentzon, N. Järvestråt, and B. L. Josefson, Journal of Materials Processing Technology Modelling chip formation of alloy 718, *J. Mater. Process. Technol*, 209 (2009) 4645–4653.
- [18] A. Gilioli, A. Manes, M. Giglio, and T. Wierzbicki, Predicting ballistic impact failure of aluminium 6061-T6 with the rate-independent Bao-Wierzbicki fracture model, *International Journal of Impact Engineering*, 76. (2015) 207–220.
- [19] M. Giglio, A. Manes, and F. Viganò, Numerical simulation of the slant fracture of a helicopter’s rotor hub with ductile damage failure criteria, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 35 (2012). 317–327.
- [20] R. Stringfellow and C. Paetsch, Modeling Material Failure During Cab Car End Frame Impact, in 2009 Joint Rail Conference, (2009) 183–192.
- [21] X. Teng and T. Wierzbicki, Effect of fracture criteria on high velocity perforation of thin beams., *Int. J. Comput. Methods*, 1 (2004) 171–200.
- [22] H. Z. Li and J. Wang, A cutting forces model for milling Inconel 718 alloy based on a material constitutive law, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 227 (2013) 1761–1775.
- [23] Y. Chen, H. Li, and J. Wang, Analytical modelling of cutting forces in near-orthogonal cutting of titanium alloy Ti6Al4V, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 229 (2015) 1122–1133.
- [24] M. H. Ali, B. a. Khidhir, M. N. M. Ansari, and B. Mohamed, FEM to predict the effect of feed rate on surface roughness with cutting force during face milling of titanium alloy, *HBRC J.*, 9 (2013) 263–269.
- [25] X. Cui, B. Zhao, F. Jiao, and J. Zheng, Chip formation and its effects on cutting force, tool temperature, tool stress, and cutting edge wear in high- and ultra-high-speed milling, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 83 (2016) 55–65.
- [26] A. Davoudinejad, E. Chiappini, S. Tirelli, M. Annoni, and M. Strano, Finite Element Simulation and Validation of Chip Formation and Cutting Forces in Dry and Cryogenic Cutting of Ti-6Al-4V, *Procedia Manuf.* 1 (2015) 728–739.
- [27] D. Xu, P. Feng, W. Li, and Y. Ma, An improved material constitutive model for simulation of high-speed cutting of 6061-T6 aluminum alloy with high accuracy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 79 (2015) 1043–1053.
- [28] M. Bäker, Finite element simulation of high-speed cutting forces, *J. Mater. Process. Technol.* 176 (2006) 117–126.
- [29] J. P. Davim, C. Maranhão, M. J. Jackson, G. Cabral, and J. Grácio, FEM analysis in high speed machining of aluminium alloy (Al7075-0) using polycrystalline diamond (PCD) and cemented carbide (K10) cutting tools, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 39 (2008) 1093–1100.
- [30] M. H. Ali, B. a. Khidhir, B. Mohamed, and a. a. Oshkour, Prediction of High Cutting Speed Parameters for Ti-6Al-4V by Using Finite Element Modeling, *Int. J. Model. Optim.* 2, (2012) 31–35.
- [31] Y. Bai and T. Wierzbicki, “Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture, *Int. J. Fract*, 161 (2010) 1–20.
- [32] Y. Li, T. Wierzbicki, M. A. Sutton, J. Yan, and X. Deng, Mixed mode stable tearing of thin sheet Al 6061-T6 specimens: Experimental measurements and finite element simulations using a modified Mohr-Coulomb fracture criterion, *Int. J. Fract.* 168 (2011) 53–71.
- [33] A. M. Beese, M. Luo, Y. Li, Y. Bai, and T. Wierzbicki, Partially coupled anisotropic fracture model for aluminum sheets, *Eng. Fract. Mech.* 77 (2010) 1128–1152.
- [34] Nguyễn Doãn Ý, Quy hoạch thực nghiệm. NXB Khoa học kỹ thuật, Hà Nội (2003).