NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG VỀ LỰC CẮT VÀ NHIỆT ĐỘ CẮT KHI MÀI PHẲNG HỢP KIM Ti-6AL-4V BẰNG ĐÁ MÀI cBN LIÊN KẾT NHỰA

SIMULATION RESEARCH ON THE CUTTING FORCES AND TEMPERATURE IN THE SURFACE GRINDING OF Ti-6AL-4V ALLOY WITH RESINOID cBN WHEEL

Phí Trọng Hùng[1,2*], Trương Hoành Sơn[2], Hoàng Văn Gợt[3], Nguyễn Kiên Trung[2]

[1]*Trường Đại học Điện lực*
[2]*Viện Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội*
[3]*Viện Nghiên cứu Cơ khí, Bộ Công Thương*

[*]Tác giả liên hệ: hungpt@epu.edu.vn

(Nhận bài: 01/10/2020; Chấp nhận đăng: 18/5/2021)

Tóm tắt - Hợp kim Ti-6Al-4V (Ti64) thường được biết tới là một vật liệu khó cắt gọt do tính dẫn nhiệt kém, phản ứng hóa học với hầu hết dụng cụ cắt và hóa cứng nhanh khi gia công. Nghiên cứu này sử dụng mô hình phần tử hữu hạn để mô phỏng quá trình mài phẳng hợp kim Ti-6Al-4V bằng đá mài cBN. Bài báo sẽ trình bày ảnh hưởng của lượng tiến dao và chiều sâu cắt đến lực cắt và nhiệt độ cắt, đồng thời mô phỏng ba giai đoạn tạo thành phoi và quá trình hình thành phoi dạng tấm đứt đoạn khi mài. Kết quả so sánh lực cắt mô phỏng với giá trị thực nghiệm ở một số bộ thí nghiệm cho sai số lớn nhất là 15%, do đó có thể sử dụng mô hình này để mô phỏng quá trình mài hợp kim Titan với độ tin cậy cao. Kết quả chỉ ra rằng, lượng tiến dao có ảnh hưởng đến nhiệt độ cắt nhiều hơn chiều sâu cắt. Bước tiến dao tăng lên làm nhiệt độ cắt giảm đi, trong khi đó tăng chiều sâu cắt sẽ làm tăng nhiệt độ cắt.

Từ khóa - Hợp kim titan; Ti-6Al-4V; Đá mài cBN; Lực cắt; Nhiệt độ cắt; Phương pháp phần tử hữu hạn

Abstract - Ti-6Al-4V (Ti64) alloy is considered as hard-to-machine material because of its low thermal conductivity and high chemical reactivity with most cutting tools and rapid work hardening during machining. A finite element model of single-grain surface grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy has been established in this research. The effects of workpiece infeed speed and depth of cut on the grinding forces and grinding temperature are presented in this paper. The formation of discontinuous lamellar structure chips in grinding process is also simulated. The maximum relative error of experimental and predicted grinding forces is 15%, then the model can be utilized for a reliable investigation of grinding process. The obtained results show that, the influence of workpiece infeed on grinding temperature is more significant compared to that of the depth of cut. The increase of feed rate can effectively reduce the grinding temperature, while increment of depth of cut produces higher grinding temperature.

Key words - Titanium alloy; Ti-6Al-4V; cBN grinding wheel; Grinding force; Grinding temperature; Finite element method

1. Đặt vấn đề

Mài là nguyên công gia công được sử dụng rộng rãi do có độ chính xác cao. Quá trình cắt gọt khi mài thông qua những lưỡi cắt rất nhỏ là các hạt mài. Do đó, việc tìm hiểu cơ chế tương tác giữa hạt mài và vật liệu phôi là rất cần thiết. Tuy nhiên, để hiểu về cơ chế bóc tách vật liệu (quá trình hình thành phoi) lại khó khăn vì quá trình tạo phoi diễn ra trong một khoảng thời gian nhỏ, không gian hẹp do đó khó quan sát được rõ ràng khi đang tiến hành gia công. Ngoài ra, nhiều hạt mài cùng tham gia cắt gọt cùng một lúc khiến việc đánh giá càng khó khăn hơn. Một đặc điểm khác của quá trình mài là năng lượng mài riêng cao đã chuyển hóa thành một lượng nhiệt lớn truyền vào đá mài, phôi và phoi. Nhiệt độ cao khiến bề mặt gia công xuất hiện nhiều khuyết tật như chuyển pha, ứng suất dư và nứt gãy tế vi, dụng cụ cắt bị phá hủy nhiệt. Do đó, việc dự đoán và hạn chế nhiệt cắt khi mài sẽ giúp nâng cao chất lượng sản phẩm [1].

Hợp kim titan có độ bền, độ cứng cao và chịu được nhiệt độ cao nên hay được sử dụng trong các ngành công nghiệp như hàng không, vũ trụ. Tuy nhiên, chính những đặc tính nổi trội đó cộng với hệ số truyền nhiệt kém khiến titan được đưa vào là một trong số các vật liệu khó cắt gọt. Khi mài titan, do nhiệt độ cao nên trên bề mặt gia công thường xuất hiện các vết cháy, đồng thời gây ra ứng suất dư ở lớp dưới bề mặt. Việc dự đoán được nhiệt độ cắt khi mài sẽ giúp cho việc chọn chế độ cắt thích hợp và nâng cao chất lượng gia công [2].

Trong thời gian gần đây đã có nhiều nghiên cứu mô phỏng quá trình gia công hợp kim titan, đặc biệt là mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) [3]. Các nghiên cứu sử dụng phương pháp này cho thấy, FEM có thể giúp hiểu hơn về cơ chế bóc tách vật liệu, lực cắt, nhiệt độ và ứng suất cắt. Wang và cộng sự [1] đã sử dụng phương pháp sai phân hữu hạn để mô phỏng quá trình mài hợp kim titan TC4, sau đó so sánh với kết quả thực nghiệm. Ảnh hưởng của bước tiến dao đến nhiệt độ cắt lớn hơn so với vận tốc cắt và chiều sâu cắt. Khi tăng lượng tiến dao thì nhiệt độ cắt giảm xuống. Bằng mô hình phần tử hữu hạn, Dai và cộng sự [4] đã đánh giá ảnh hưởng của tốc độ mài (20~400 m/s) và chiều dày phoi không biến dạng (1~8 μm) đến quá trình hình thành phoi khi mài hợp kim Niken Inconel 718 bằng một hạt mài. Tần số phân đoạn phoi tăng lên khi tăng tốc độ cắt. Dựa trên thay đổi của biến dạng dẻo tương đương, ứng suất von Mises và lực cắt, nhóm nghiên cứu đã xác định được tốc độ cắt tới hạn cho hợp kim này là 150 m/s. Fu và cộng sự [5] đã phân tích tác động của tốc

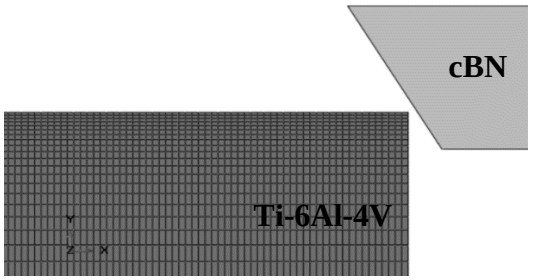
[1] Electric Power University (Hung Phi)
[2] School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology (Hung Phi, Truong Hoang Son, Nguyen Kien Trung)
[3] National Research Institute of Mechanical Engineering, MOIT (Hoang Van Got)

độ cắt và chiều sâu cắt thực tế đến lực cắt và ứng suất cắt khi mài đơn hạt mài hợp kim titan Ti-6Al-4V thông qua mô hình FEM. Dựa vào chiều sâu hình thành phoi tới hạn, nghiên cứu đó đã xác định được tốc độ cắt tới hạn là 60 m/s. Chiều sâu hình thành phoi giới hạn giảm xuống khi tốc độ cắt tăng từ 20 đến 60 m/s và tăng lên khi tốc độ cắt nằm trong khoảng từ 60 đến 200 m/s. Trong khi đó, Li và cộng sự [2] lại tìm cách cải thiện độ chính xác của các thông số mô phỏng bằng cách thay đổi hệ số ma sát khi mài phẳng hợp chất PTMCs. Kết quả nghiên cứu cho biết, sai số giữa lực cắt mô phỏng và thực nghiệm nằm trong phạm vi 2~9%, trong khi sai số giữa nhiệt độ cắt mô phỏng và thực nghiệm là 7~15%. Trong nghiên cứu của mình, Liu và cộng sự [3] đã mô phỏng quá trình mài cao tốc hợp chất PTMCs, trong đó có mô tả cơ chế bóc gọt vật liệu nền Ti64 và hạt tăng cường TiCp. Ngoài ra, ảnh hưởng của chế độ cắt đến chất lượng bề mặt cũng được các tác giả đánh giá và phân tích. Zhou và cộng sự [6] đã thiết lập một mô hình mài cao tốc hợp chất TiCp/Ti-6Al-4V bằng hai hạt mài kế tiếp nhau. Các tác giả đã nghiên cứu về cơ chế lan truyền vết nứt thông qua ứng suất tổng hợp và lực cắt, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của chiều dày phoi không biến dạng đến các khuyết tật trên bề mặt gia công.

Mục tiêu của nghiên cứu này là đưa ra được mô hình dự đoán lực cắt và nhiệt độ cắt khi mài phẳng hợp kim Ti64 bằng đá mài cBN dựa trên phần mềm mô phỏng ABAQUS/Explicit. Kết quả của bài báo sẽ làm rõ hơn cơ chế bóc tách vật liệu trong quá trình mài và từ đó có thể được sử dụng để xác định được chế độ cắt thích hợp cho quá trình mài hợp kim này. Kết quả mô phỏng sẽ được một phần đối chứng với kết quả mài thực nghiệm để khẳng định sự chính xác của mô hình mô phỏng.

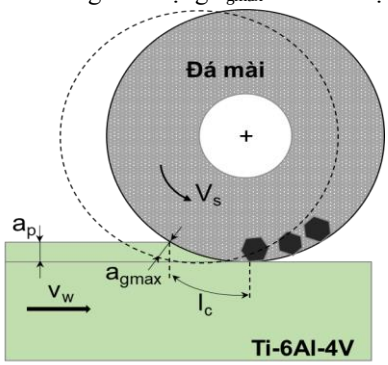
2. Mô tả mô hình phần tử hữu hạn và thí nghiệm kiểm chứng

2.1. Mô tả mô hình phần tử hữu hạn



Hình 1. *Mô hình phần tử hữu hạn 2D cho mài phẳng đơn hạt mài*

Để dự đoán được lực cắt và nhiệt độ khi mài, trong nghiên cứu đã đưa ra một mô hình phần tử hữu hạn 2 chiều như Hình 1. Quá trình mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm ABAQUS/Explicit dựa trên thuật toán Lagrange. Phôi của mô hình có chiều dài 310 µm (theo phương X) và chiều cao 100 µm (theo phương Y). Phôi được chia thành 13869 phần tử tứ giác phân tích cơ nhiệt kết hợp (CPE4RT), mỗi phần tử có 4 nút điểm. Nhiệt lượng mất đi của đá mài và phôi chủ yếu là do hiện tượng đối lưu, với hệ số truyền nhiệt đối lưu khi mài khô và mài ướt lần lượt là 81,148 [7] và 82000 W/m^2.K [2]. Nhiệt lượng phân tán do bức xạ nhiệt không đáng kể nên được bỏ qua trong mô hình này. Hạt mài thường được mô hình hóa bởi một lục giác đều. Để cho đơn giản việc tính toán mô phỏng, mô hình trong nghiên cứu này chỉ sử dụng hạt mài cBN dưới dạng một nửa hình lục giác với góc cắt trước bằng -30°. Các rằng buộc và giả định bao gồm: Mặt đáy của phôi được ràng buộc cố định; Hạt mài cBN được coi là tuyệt đối cứng và chuyển động tịnh tiến với vận tốc bằng vận tốc cắt khi mài. Chiều sâu cắt trong mô hình được lấy bằng một nửa chiều dày phoi không biến dạng a_{gmax} như thể hiện ở Hình 2.



Hình 2. *Sơ đồ quá trình mài đơn hạt mài (Tham khảo từ [4])*

2.1.1. Mô hình vật liệu

Hợp kim Ti64 chứa 6% nhôm để ổn định pha alpha và 4% vanadi để ổn định pha beta. Ngoài ra, các nguyên tố này còn giúp nâng cao độ bền, khả năng biến dạng và tính chống ô xi hóa của hợp kim. Để mô tả đặc tính của vật liệu Ti64 dưới điều kiện biến dạng lớn, tốc độ biến dạng cao và nhiệt độ cắt cao, trong nghiên cứu đã sử dụng mô hình biến dạng dẻo vật liệu của Johnson-Cock (J-C) [4] có dạng:

$$\sigma=(A+B\varepsilon^{n})\left[1+C\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1-\left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)^{m}\right] \quad (1)$$

Trong đó, σ là ứng suất dòng tương đương; ε là biến dạng dòng tương đương; $\dot{\varepsilon}$ là tốc độ biến dạng tương đương; $\dot{\varepsilon}_0$ là tốc độ biến dạng dẻo tham chiếu; T là nhiệt độ phôi; T_m và T_r lần lượt là nhiệt độ nóng chảy của phôi và nhiệt độ phòng. Hệ số A là giới hạn đàn hồi; B là mô đun hóa cứng; C là hệ số tốc độ biến dạng; n là hệ số hóa cứng; m là hệ số mềm nhiệt. Bảng 1 trình bày các hằng số mô hình vật liệu J-C cho vật liệu Ti64, thu được từ thực nghiệm thông qua các kiểm tra xoắn, kéo tĩnh và thanh áp lực Hopkinson cắt (SHPB) [6]. Do hạt mài cBN có độ cứng lớn hơn nhiều so với với hợp kim Ti64 nên nó được coi là tuyệt đối cứng trong nghiên cứu này.

Bảng 1. *Các thông số mô hình vật liệu Johnson-Cook của hợp kim Ti-6Al-4V*

A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	T_m (°C)	T_r (°C)
875	793	0,01	0,386	0,71	1560	20

2.1.2. Tiêu chuẩn phá hủy vật liệu

Nghiên cứu này áp dụng tiêu chuẩn phá hủy cắt Johnson-Cook đối với vật liệu Ti64. Hiện tượng phá hủy vật liệu xảy ra khi hệ số phá hủy w_s lớn hơn 1. Hệ số phá hủy w_s được tính theo công thức [5]:

$$\omega_s=\sum\frac{\Delta\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_f^{pl}} \quad (2)$$

Trong đó, $\Delta\varepsilon^{pl}$ là gia số của biến dạng dẻo tương đương, ε_f^{pl} là biến dạng phá hủy và được tính như sau [5]:

$$\varepsilon_f^{pl}=(D_1+D_2e^{D_3\sigma^*})\left[1+D_4\ln\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right]\left[1-D_5\left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)\right] \quad (3)$$

Trong đó, biến dạng phá hủy được xác định nhờ các biến số σ^*, $\dot{\varepsilon}_0$, và T. D_1 đến D_5 là các tham số trong tiêu chuẩn phá hủy cắt Johnson-Cook. Các tham số phá hủy cắt của hợp kim Ti-6Al-4V được lấy từ nghiên cứu của Fu [5] và được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. *Các tham số phá hủy cắt J-C của hợp kim Ti64*

Vật liệu	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
Ti64	-0,09	0,25	-0,5	0,014	3,87

2.1.3. Điều kiện biên và định luật tiếp xúc

Trong quá trình mài, đá mài cBN thực hiện gia công cắt gọt bằng các hạt mài có kích thước rất nhỏ, chuyển động của các hạt mài này được mô tả trong Hình 2. Chiều dài của đường cong tiếp xúc giữa hạt mài và phôi được tính như sau [6]:

$$l_c=\sqrt{d_s.a_p} \quad (4)$$

Trong đó, a_p là chiều sâu cắt; d_s là đường kính ngoài của đá mài. Giá trị l_c tính được là 0,71 ÷ 1,23 mm, gấp 2,5 đến 4 lần chiều dài của mô hình phôi (310 µm) tính theo phương X. Do đó, chuyển động của hạt mài cBN có thể coi là một đường thẳng trong mô hình mô phỏng cắt. Ngoài ra, chiều sâu cắt trong mô hình được lấy bằng một nửa chiều dày phoi không biến dạng (a_{gmax}), với a_{gmax} tính theo công thức [6] dựa trên chiều sâu cắt thực (a_p):

$$a_{gmax}=2\pi d_s\left(\frac{v_w}{v_s}\right)\sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \quad (5)$$

Trong đó, v_s tốc độ cắt, v_w là lượng tiến dao, d_s là đường kính ngoài của đá mài (d_s = 100 mm).

Khi mài, biến dạng dẻo và ma sát làm sinh ra nhiệt. Nếu nhiệt độ tăng quá cao sẽ làm biến đổi cấu trúc của vật liệu. Trong mô hình này, ma sát giữa hạt mài và phôi được mô tả bằng định luật Coulomb. Trong đó, τ_f là ứng suất ma sát; σ_n là ứng suất tiếp xúc vuông góc; µ là hệ số ma sát [8]. Hệ số ma sát µ được lấy bằng hệ số tỉ lệ lực mài F_t/F_n thu được khi thí nghiệm [4] (trong nghiên cứu này có giá trị bằng 0,289 khi mài khô và 0,186 khi mài ướt).

$$\tau_f=\mu.\sigma_n \quad (6)$$

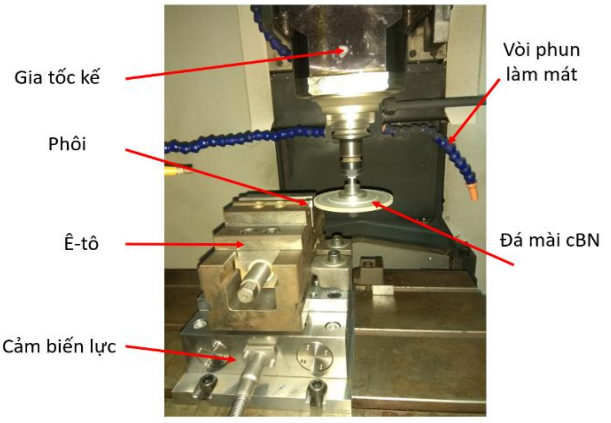
Trong phần mềm ABAQUS/Explicit còn có một hệ số, gọi là hằng số thực nghiệm Taylor-Quinney (được mặc định là 90% [4]) để mô tả tỉ lệ % của năng lượng biến dạng dẻo được chuyển hóa thành nhiệt năng khi mài.

2.2. Mô tả thí nghiệm kiểm chứng

Hợp kim Ti64 sử dụng trong thí nghiệm có kích thước 16mm (L) × 10mm (W) × 9mm (H). Các đặc tính cơ nhiệt của hợp kim Ti64 và hạt mài cBN được trình bày trong Bảng 3. Quá trình mài được thực hiện trên trung tâm gia công trục đứng cao tốc HS Super TC500, Fuhong Machinery Co., Đài Loan, như trong Hình 4. Đá mài cBN có đường kính ngoài 100 mm, chiều dày 5mm và độ hạt là #120. Có tổng cộng là 24 thí nghiệm được thực hiện dựa trên việc thay đổi giá trị các thông số cắt gọt (lượng tiến dao, chiều sâu cắt, chế độ làm mát). Vận tốc cắt v_s không đổi là 30 m/s, chiều sâu cắt a_p từ 0,005~0,015 mm, lượng tiến dao v_w trong khoảng 1000~10000 mm/phút. Việc chọn giá trị lượng tiến dao và chiều sâu cắt dựa trên tham khảo các sổ tay gia công và các nghiên cứu thực nghiệm đăng trên các tạp chí quốc tế uy tín. Quá trình mài được thực hiện với mài khô và mài ướt, trong đó mài ướt sử dụng dầu cắt gọt tổng hợp hòa tan trong nước nồng độ 2 vol%. Lực cắt được đo bằng cảm biến đo lực áp điện Kistler. Cảm biến đo lực được kết nối với bộ chuyển đổi A/D, sau đó hệ thống thu thập dữ liệu sẽ xử lý và ghi lại các giá trị lực cắt thu được. Lực cắt trong mỗi thí nghiệm được lấy là giá trị trung bình của lực cắt trong 10 hành trình mài. Để loại trừ ảnh hưởng của rung động đến kết quả đo, rung động của trục chính được giám sát nhờ gia tốc kế ba trục.

Bảng 3. *Đặc tính cơ nhiệt của hợp kim Ti64 và hạt mài cBN*

Vật liệu	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poisson	Khối lượng riêng (kg/m^3)	Hệ số dẫn nhiệt (W/m.°C)	Nhiệt dung riêng (J/kg.°C)	Hệ số bức xạ nhiệt
Ti64	108	0,33	4440	6,6	580	0,4
cBN	909	0,12	3120	240	670	0,4



Hình 4. *Sơ đồ mài thực nghiệm*

Để kiểm nghiệm lại độ tin cậy của mô hình mô phỏng cắt FEM, các lực cắt mô phỏng (bao gồm lực cắt pháp tuyến f_n và lực cắt tiếp tuyến f_t) được so sánh với lực cắt thực nghiệm ở một số chế độ cắt nhất định. Lực cắt thực nghiệm được đo khi tiến hành thí nghiệm mài ở cùng thông số chế độ cắt. Lực cắt trung bình thực nghiệm của một hạt mài (f_n and f_t) được tính theo công thức sau [8]:

$$f_n = F_n/N_d.b.l_c$$
$$f_t = F_t/N_d.b.l_c \quad (7)$$

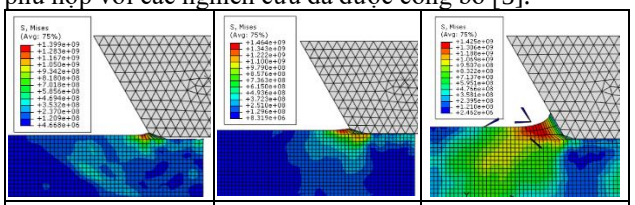
Trong đó, F_n và F_t là lực cắt pháp tuyến và lực cắt tiếp tuyến thực nghiệm; b là chiều rộng mài (b = 4,5 mm); l_c là chiều dài cung tiếp xúc giữa đá mài và phôi; N_d là mật độ hạt mài tham gia cắt gọt, (N_d =12,5 hạt/mm^2), tính được sau khi quan sát bề mặt của đá mài qua kính hiển vi.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Mô phỏng quá trình hình thành phoi

Quá trình mô phỏng cắt chỉ ra ba giai đoạn chính của quá trình mài bao gồm cọ xát, cày xước và tạo phoi. Trong Hình 5 thể hiện 3 giai đoạn đó khi mài hợp kim Ti64 bằng một hạt mài cBN. Giai đoạn cọ xát xuất hiện khi chiều sâu cắt nhỏ cùng hiện tượng biến dạng dẻo trên bề mặt (Hình

5a). Khi chiều sâu cắt tăng lên thì giai đoạn cày xước xảy ra với vật liệu bị biến dạng dẻo khiến bề mặt phôi bị lồi lên (Hình 5b). Trong giai đoạn cọ xát và cày xước, vật liệu phôi không bị bóc gọt đi do chiều sâu cắt của hạt mài nhỏ hơn chiều sâu hình thành phoi tới hạn. Khi chiều sâu cắt đạt tới chiều sâu hình thành phoi tới hạn thì phoi được tạo thành và tách ra khỏi bề mặt phôi (Hình 5c). Qua đó ta thấy, tồn tại một giá trị gọi là gọi là chiều sâu hình thành phoi tới hạn mà khi chiều sâu cắt nhỏ hơn giá trị đó thì hạt mài chỉ cọ xát và cày xước mà không tạo thành phoi. Kiểu phoi được hình thành là phoi dạng tấm đứt đoạn. Hiện tượng này khá phù hợp với các nghiên cứu đã được công bố [5].

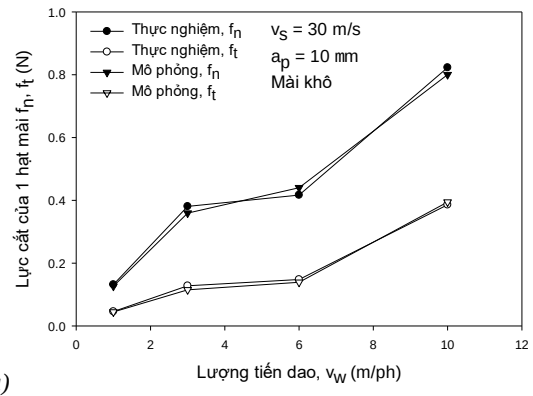


(a) Cọ xát | *(b) Cày xước* | *(c) Hình thành phoi*

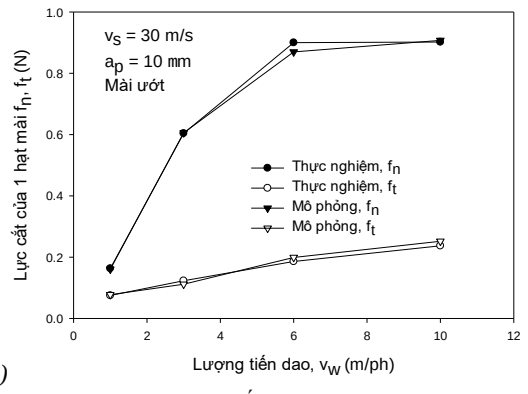
Hình 5. *Mô phỏng ba giai đoạn chính khi mài hợp kim Ti64*

3.2. Mô phỏng lực cắt

Để đảm bảo tính tin cậy của mô hình mô phỏng ở phương diện lực cắt, một số kết quả mô phỏng được so sánh với giá trị lực cắt thực nghiệm ở cùng chế độ cắt do nhóm tác giả đã thực hiện ở một nghiên cứu khác. Hình 6 thể hiện sự so sánh giữa lực cắt mô phỏng và lực cắt thực nghiệm ở chế độ cắt v_s = 30 m/s, a_p = 0,01mm, mài khô.



a)



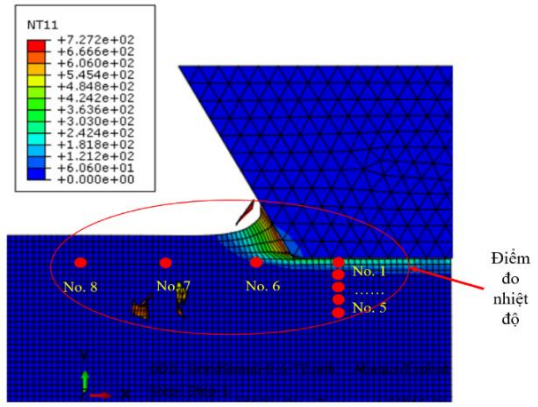
b)

Hình 6. *So sánh giữa lực cắt mô phỏng và thực nghiệm khi mài đơn hạt mài. (a) Mài khô; (b) Mài ướt*

Giá trị lực cắt mô phỏng trên phôi được lấy ở điểm tham khảo (reference point) trên hạt mài do lực và phản lực có giá trị bằng nhau và hạt mài được coi là tuyệt đối cứng (rigid body). Kết quả mô phỏng lực cắt của mô hình là khá sát với thực nghiệm. Khi chiều sâu cắt là 0,01 mm và bước tiến dao bằng 3000 mm/ph (mài khô), lực cắt f_n thực nghiệm và mô phỏng tương ứng là 0,381 và 0,359 N (sai lệch 5,8%), còn lực cắt f_t lần lượt là 0,128 và 0,115 N (sai số 10,2%). Do vậy, sai số giữa lực cắt mô phỏng và thực nghiệm khi mài phẳng hợp kim Ti64 là tương đối nhỏ, từ 1~15% (< 15%). Mô phỏng cắt cho thấy, lực cắt tăng khi tăng chiều sâu cắt hoặc bước tiến dao do hạt mài ăn sâu hơn vào phôi khiến chiều dày phoi không biến dạng và diện tích mặt cắt ngang của phoi tăng lên [9].

3.3. Mô phỏng nhiệt độ cắt

Trong Hình 7 là mô phỏng về phân bố nhiệt độ trên phôi khi mài với lượng chạy dao là 3000 mm/ph, chiều sâu cắt là 0,015 mm, mài khô. Nhiệt độ cắt mô phỏng này được thực hiện trên cùng một mô hình được sử dụng để mô phỏng lực cắt. Để khảo sát cụ thể hơn về biến đổi nhiệt độ trên phôi, trong nghiên cứu đã lựa chọn ra 8 điểm để khảo sát sự thay đổi của nhiệt cắt theo thời gian.

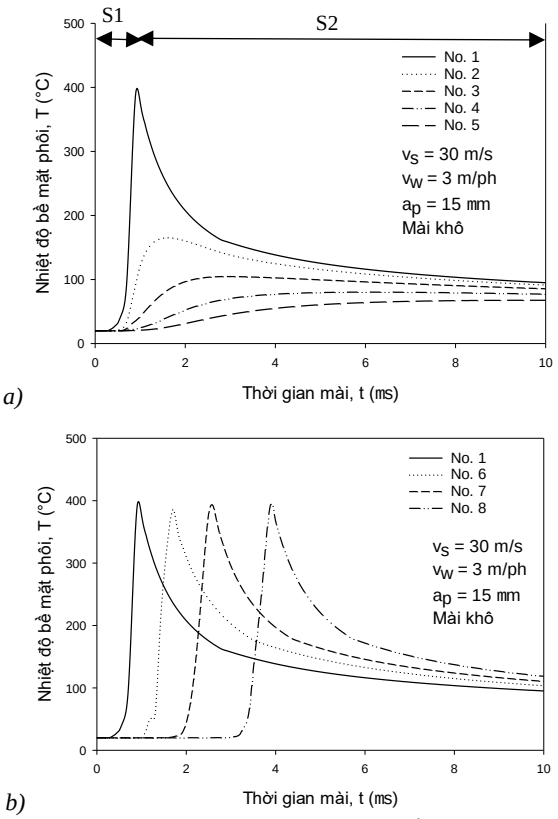


Hình 7. *Phân bố nhiệt độ trên phôi khi mài*

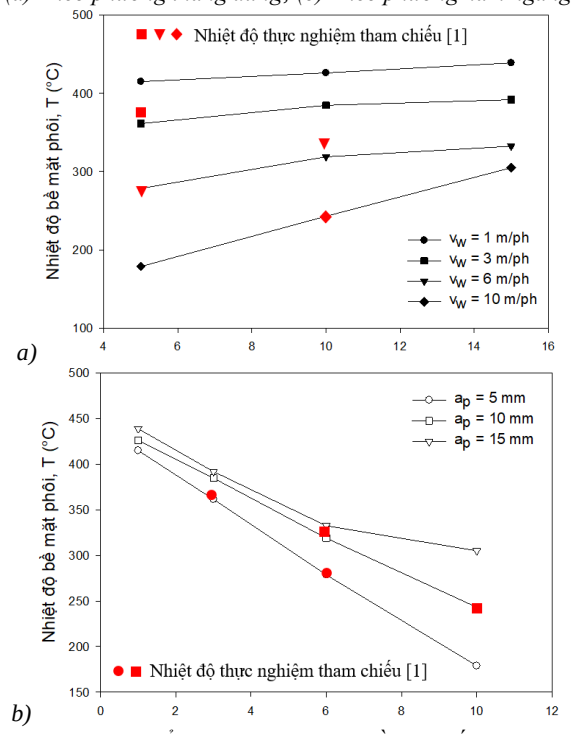
Hình 8 là đồ thị phân bố nhiệt độ tại 8 điểm khác nhau, trong đó 5 điểm nằm dọc theo phương thẳng đứng tính từ bề mặt mài trở xuống và 3 điểm nằm trên bề mặt mài theo phương ngang. Điểm 1 là điểm ở trên cùng và điểm 5 nằm ở dưới cùng. Đường cong nhiệt độ của điểm 1 có thể chia thành 2 giai đoạn là S_1 và S_2. Trong giai đoạn S_1, khi hạt mài cBN tiến tới gần điểm 1 thì nhiệt độ tại điểm đó tăng lên và đạt tới giá trị cực đại khi hạt mài ở ngay phía trên nó. Nhiệt độ lớn nhất tại điểm 1 (khoảng 392°C) có thể được coi là nhiệt độ ở vùng tiếp xúc giữa hạt mài và phôi. Trong giai đoạn S_2, khi hạt mài cBN đi ra xa khỏi điểm 1 thì nhiệt độ tại đó giảm xuống do nhiệt lượng truyền sang các vùng lân cận có nhiệt độ thấp hơn. Còn theo phương ngang, có thể thấy nhiệt độ tại các điểm khác nhau (điểm 6 đến 8) trên bề mặt phôi là xấp xỉ nhau. Tuy nhiên, thời điểm để các điểm đó đạt tới nhiệt độ cao nhất là không giống nhau. Quá trình mô phỏng cắt khi chiều sâu cắt là 0,015 mm và lượng tiến dao là 3000 mm/ph thì nhiệt độ lớn nhất trên bề mặt phôi là 392°C.

Hình 9 là đồ thị nhiệt độ trên bề mặt phôi dưới các chế độ cắt khác nhau. Từ Hình 9 có thể thấy, nhiệt độ cắt tăng lên khi chiều sâu cắt tăng. Tăng chiều sâu cắt một mặt dẫn đến tăng chiều dày phoi không biến dạng a_{gmax} và lực cắt tiếp tuyến khiến nhiệt lượng sinh ra nhiều hơn. Mặt khác làm cho nhiệt cắt khó phân tán hơn [10, 11]. Còn tăng bước tiến dao làm cho nguồn nhiệt di chuyển nhanh hơn trên bề mặt phôi khiến nhiệt độ cắt giảm xuống [12]. Kết quả mô phỏng nhiệt độ bề mặt

phôi khá phù hợp với kết quả thực nghiệm trong một nghiên cứu trước đây [1]. Khi $a_{gmax}/2 \approx 4$ µm (ứng với chế độ cắt trong nghiên cứu này v_w = 3000 mm/ph; a_p = 0,005 mm) thì nhiệt độ cao nhất của bề mặt phôi trong mô phỏng và trong thực nghiệm kiểm chứng là 361 và 370 ºC (sai số 2,5%).



Hình 8. *Đường cong nhiệt độ tại 8 điểm trên phôi (a) Theo phương thẳng đứng; (b) Theo phương nằm ngang*



Hình 9. *Ảnh hưởng của (a) chiều sâu cắt và (b) lượng tiến dao đến nhiệt độ cắt*

4. Kết luận

Từ các kết quả thu được và các thảo luận từ nghiên cứu mô phỏng quá trình mài hợp kim Ti64 bằng phương pháp phần tử hữu hạn, các kết luận được rút ra là:

- Kiểu phoi được hình thành bởi quá trình cắt của một hạt mài là phoi dạng tấm đứt đoạn.

- Quá trình mô phỏng lực cắt thể hiện xu hướng lực cắt tăng khi tăng chiều sâu cắt hoặc bước tiến dao. Sai số lớn nhất giữa lực cắt thực nghiệm và lực cắt mô phỏng là 15%. Do đó, mô hình này có thể được sử dụng để dự đoán lực cắt trong quá trình mài hợp kim này.

- Kết quả mô phỏng nhiệt độ bề mặt phôi phù hợp với kết quả trong một số nghiên cứu thực nghiệm khác đã được công bố, điều này khẳng định tính tham khảo tin cậy của mô hình mô phỏng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] X. Wang, T. Yu, X. Sun, Y. Shi, W. Wang, "Study of 3D grinding temperature field based on finite difference method: considering machining parameters and energy partition", *Int J Adv Manuf Technol* 84, 2016, 915–927.

[2] Z. Li, W. Ding, C. Liu, H. Su, "Prediction of grinding temperature of PTMCs based on the varied coefficients of friction in conventional-speed and high-speed surface grinding", *Int J Adv Manuf Technol*, 90, 2017, 2335–2344.

[3] C. Liu, W. Ding, T. Yu, C. Yang, "Materials removal mechanism in high-speed grinding of particulate reinforced titanium matrix composites", *Precision Engineering*, 51, 2018, 68–77.

[4] J. Dai, W. Ding, L. Zhang, J. Xu, H. Su," Understanding the effects of grinding speed and undeformed chip thickness on the chip formation in high-speed grinding", *Int J Adv Manuf Technol*, 81 2015, 995–1005.

[5] D. Fu, W. Ding, Q. Miao, J. Xu, "Simulation research on the grinding forces and stresses distribution in single-grain surface grinding of Ti-6Al-4V alloy when considering the actual cutting-depth variation", *Int J Adv Manuf Technol*, 91, 2017, 3591–3602.

[6] H. Zhou, W. Ding, C. Liu, "Material removal mechanism of PTMCs in high-speed grinding when considering consecutive action of two abrasive grains", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 2019, 153–165.

[7] B. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Wang, M. Yang, D. Jia, N. Zhang, Q. Wu, W. Ding, "Numerical and experimental research on the grinding temperature of minimum quantity lubrication cooling of different workpiece materials using vegetable oil-based nanofluids", *Int J Adv Manuf Technol*, 93, 2017, 1971–1988.

[8] W. Ding, Z. Li, C. Liu, H. Zhou, "Grinding performance of TiCp/Ti-6Al-4V composites with CBN wheels, part II: material removal behavior based on FEM", *Procedia CIRP*, 77, 2018, 529-532.

[9] Z. Li, W. Ding, C. Liu, H. Zhou, "Grinding performance of TiCp/Ti-6Al-4V composites with CBN wheels, part I: experimental investigation and surface features", *Procedia CIRP*, 77, 2018, 525–528.

[10] L. Zheng, D. Wenfeng, S. Long, X. Xinxin, F. Yucan, "Comparative investigation on high-speed grinding of TiCp/Ti–6Al–4V particulate reinforced titanium matrix composites with single-layer electroplated and brazed CBN wheels", *Chinese Journal of Aeronautics*, 29(5) 2016, 1414–1424.

[11] N. Qian, W. Ding, Y. Zhu, "Comparative investigation on grindability of K4125 and Inconel718 nickel-based superalloys", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 2018, 1649–1661.

[12] Y. Zhang, B. Li, J. Yang, S. Liang, "Modeling and optimization of alloy steel 20CrMnTi grinding process parameters based on experiment investigation", *Int J Adv Manuf Technol*, 95, 2018, 1859–1873.