

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG VỀ CƠ CHẾ TẠO PHOI VÀ LỰC CẮT KHI MÀI PHẪNG GANG NÉN CGI

EXPERIMENTAL AND SIMULATION RESEARCH ON THE CHIP FORMATION MECHANISM AND CUTTING FORCES IN THE SURFACE GRINDING OF COMPACTED GRAPHITE IRON CGI

Phí Trọng Hùng
Trường Đại học Điện lực

Email: hungpt@epu.edu.vn

TÓM TẮT

Các đặc tính độc đáo của gang nén *Compacted Graphite Iron (CGI)* khiến vật liệu này ngày càng được sử dụng nhiều trong công nghiệp ô tô và đầu máy xe lửa. Các cạnh tròn và hình dạng đặc biệt của graphite làm tăng khả năng chống nứt của sắt và giúp graphite bám dính tốt hơn vào sắt. Tuy nhiên, cơ tính và đặc tính nhiệt vượt trội của CGI so với gang xám và gang dẻo lại đi cùng với khả năng gia công tương đối kém. Nghiên cứu này thực hiện quá trình mài phẳng gang nén CGI bằng đá mài cBN dưới các lượng tiến dao khác nhau trong hai môi trường mài khô và mài ướt. Đồng thời, quá trình mài cũng được mô hình hóa bằng phần mềm phân tích phần tử hữu hạn ABAQUS/EXPLICIT, trong đó sử dụng liên kết buộc (Tie Constraint) để mô tả tương tác giữa graphite với sắt. Quá trình mô phỏng cho thấy ba giai đoạn chính của quá trình mài là cọ xát, cày xới và tạo phoi. Kiểu phoi được hình thành là phoi dạng tấm đứt đoạn. Kết quả so sánh lực cắt mô phỏng với giá trị thực nghiệm có sai số lớn nhất là 15%.

Từ khóa: CGI; Đá mài cBN; Mài phẳng; Mô phỏng.

ABSTRACT

The unique properties of *Compacted Graphite Iron (CGI)* have led to its increasing use in the automotive and locomotive industries. The rounded edges and special shape of graphite enhance the crack resistance of the iron matrix and improve its adhesion to the matrix. However, CGI's superior mechanical and thermal properties compared to gray iron and ductile iron are accompanied by its relatively poor machinability. This study involved grinding compacted graphite iron using cBN wheels under different feed-rates in dry and wet cutting environments. Simultaneously, the grinding process was modeled using the ABAQUS/EXPLICIT finite element analysis software, employing the tie constraint to describe the interaction between graphite and iron. The analysis exhibits the three periods in the grinding process are the rubbing, ploughing, and chip formation. The formation of discontinuous lamellar structure chips is also simulated. The maximum relative error of experimental and predicted grinding forces is 15%.

Keywords: *Compacted Graphite Iron; cBN grinding wheel; Surface grinding; Simulation.* 

1. GIỚI THIỆU

Gang nén (CGI) được coi là một vật liệu tiềm năng có thể sử dụng để chế tạo các bộ phận động cơ. CGI đang dần thay thế gang xám trong xi lanh động cơ do vật liệu này có độ bền, khả năng chịu nhiệt, tính chống mài mòn và chịu mỏi tốt. Tuy nhiên, những đặc tính vượt trội này dẫn đến các khó khăn khi gia công CGI như năng suất gia công thấp, chi phí cao, dụng cụ nhanh mòn và chất lượng bề mặt kém. Những vấn đề đó đặt ra những thách thức nghiêm trọng đối với sản xuất loạt lớn, hàng khối và hạn chế ứng dụng của CGI trong chế tạo động cơ [1].

Phân tích bằng phần tử hữu hạn (FEM) có thể thu được các thông tin đầu ra như nhiệt độ cắt, lực cắt, hình dạng phoi và cơ chế cắt gọt. Ngoài ra, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để nghiên cứu quá trình cắt gọt có thể giảm đáng kể thời gian và chi phí thực nghiệm. Đây là một trong những phương pháp nghiên cứu tiết kiệm và thân thiện nhất với môi trường [2].

Để mô hình hóa chính xác quá trình cắt gọt CGI, các mô hình phần tử hữu hạn, phương trình cấu thành và tiêu chuẩn đứt gãy của CGI đã được tối ưu hóa trong nhiều nghiên cứu khác nhau. Tuy nhiên, các mô hình FEM thông thường dành cho vật liệu đồng nhất không đủ để mô phỏng biến dạng cục bộ của các vật liệu không đồng nhất, chẳng hạn như gang và thép. Để khắc phục hạn chế này, các mô hình FEM dựa trên cấu trúc tế vi đã được phát triển. Meng và cộng sự [1] sử dụng một phương pháp mới dựa trên nhận dạng hình ảnh MATLAB và lập trình Python để thiết lập mô hình cấu trúc tế vi các hạt graphite và perlite. Mô hình này được dùng để nghiên cứu hình dạng và cơ chế hình thành phoi, hình thái bề mặt cắt và nhiệt độ cắt. Kết quả mô phỏng cho thấy trên bề mặt phoi

hình thành các vết nứt và các hốc graphite lớn cũng xuất hiện trên bề mặt cắt. Nghiên cứu của Niu và cộng sự [2] đánh giá ảnh hưởng của cấu trúc tế vi CGI đến sự hình thành phoi răng cưa khi tiện, trong đó sử dụng một mô hình mô phỏng cấu trúc tế vi của CGI. Kết quả cho thấy sự hình thành phoi răng cưa chịu ảnh hưởng của các nứt gãy giòn theo chu kỳ do phân bố của graphite trong CGI gây ra. Điều đó dẫn đến các thay đổi về hình dạng và kích thước của phoi răng cưa. Trong nghiên cứu của Walid và cộng sự [3], mô hình hóa cấu trúc tế vi của CGI bao gồm ba thành phần chính graphite, perlite và ferite được thực hiện dựa trên tiêu chuẩn nứt gãy do biến dạng dẻo tích lũy. Kết quả mô phỏng cho thấy phoi hình thành chủ yếu do sự xuất hiện và lan rộng của các vết nứt trên bề mặt phôi. Các vết nứt xuất hiện từ các hạt graphite sau đó lan rộng ra nền sắt. Phoi răng cưa tạo ra trong quá trình gia công CGI chủ yếu là do sự tồn tại của graphite trong nền sắt.

Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tập trung vào các nguyên công như tiện, phay vật liệu CGI mà ít quan tâm đến quá trình mài. Trong công trình này, thí nghiệm về mài phẳng gang nén CGI được thực hiện song song với mô hình hóa và mô phỏng cấu trúc tế vi của CGI khi gia công để tìm hiểu về cơ chế tạo phoi và lực mài. Kết quả mô phỏng được so sánh và kiểm chứng bằng dữ liệu thực nghiệm.

2. CÁC BƯỚC THÍ NGHIỆM

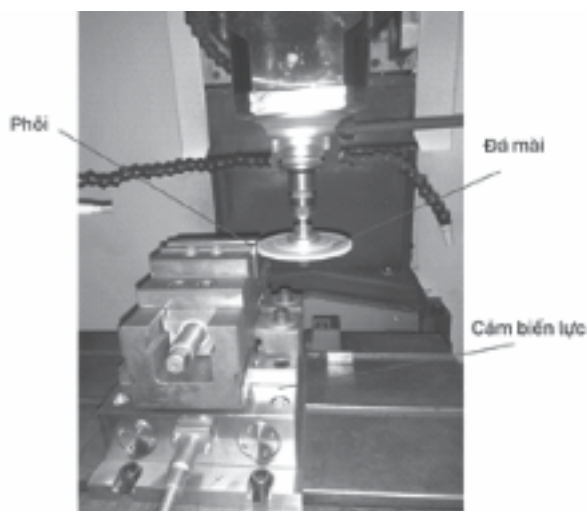
Quá trình mài được thực hiện trên trung tâm gia công trục đứng cao tốc (HS Super MC500, Fuhong Machinery Co., Đài Loan) như trong Hình 1. Đường kính và cỡ hạt mài của đá mài cBN lần lượt là 100 mm và #120. Kích thước của mẫu gang nén GJV-450 là 16×10×9 mm, với chiều rộng cắt là 4,5 mm và chiều dài mỗi lần cắt là 16 mm. Các đặc tính cơ nhiệt của gang nén GJV-450 (bao gồm pearlite và

graphite) và hạt mài cBN được trình bày trong Bảng 1. Chế độ mài thuận được sử dụng trong tất cả các thí nghiệm với tốc độ quay của đá mài không đổi là 5733 vòng/phút (tương đương với tốc độ cắt là 30 m/giây). Có tổng cộng là 8 thí nghiệm được thực hiện dựa trên việc thay đổi giá trị các thông số cắt gọt. Trong đó, tốc độ tiến dao v_w là 1, 3, 6, 10 m/phút và chiều sâu cắt không đổi là 10 μm , trong hai môi trường

mài khô và mài ướt. Khi mài ướt, dung dịch dầu tổng hợp nồng độ 2% được cung cấp với lưu lượng 30 lít/phút qua hai vòi phun làm mát. Lực cắt được đo bằng cảm biến đo lực áp điện (9139AA, KISTLER Instrument), cho phép đo lực cắt pháp tuyến và tiếp tuyến. Cảm biến lực được kết nối với bộ chuyển đổi A/D, sau đó dữ liệu được xử lý và ghi lại bởi hệ thống thu thập dữ liệu.

Bảng 1. Đặc tính cơ nhiệt của gang nén GJV-450 và hạt mài cBN [1]

Vật liệu	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poisson	Khối lượng riêng (kg/m^3)	Hệ số dẫn nhiệt ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	Nhiệt dung riêng ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)
Graphite	25	0,2	2560	130	837
Pearlite	209	0,3	7872	50	473
cBN	909	0,12	3120	240	670



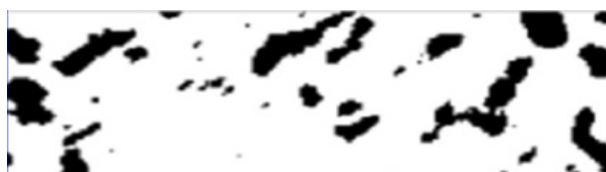
Hình 1. Sơ đồ mài thực nghiệm

3. MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN CỦA CGI

3.1. Mô hình cấu trúc tế vi của CGI

Các hạt graphite trong mẫu GJV-450 thể hiện sự không đồng nhất về hình dạng và kích thước. Các hạt này phân bố không đồng

đều trong vật liệu nền như trong Hình 2a. Để mô phỏng cấu trúc tế vi, một phần tử đại diện được lựa chọn dựa trên ảnh SEM của GJV-450. Quá trình thiết lập mô hình cấu trúc tế vi của graphite được mô tả trong Hình 2. Đầu tiên, đường viền của các hạt graphite được trích xuất từ ảnh SEM và được lưu dưới dạng tệp .dwg tiêu chuẩn bằng phần mềm hỗ trợ thiết kế. Sau đó, các tệp này được nhập vào ABAQUS dưới dạng Sketch thể hiện cấu trúc tế vi của graphite. Ngược lại, để thiết lập mô hình cấu trúc tế vi của vật liệu nền perlite, đường viền của các hạt graphite được loại bỏ khỏi ảnh SEM. Cuối cùng, mô hình cấu trúc tế vi của GJV-450 được xây dựng bằng cách ghép các mô hình cấu trúc tế vi của perlite và graphite, trong đó mỗi loại có các tính chất cơ học và vật lý khác nhau.



(a)



(b)



(c)



(d)

Hình 2. Quá trình xây dựng mô hình cấu trúc tế vi của GJV-450: (a) Ảnh SEM của GJV-450; (b) Bản vẽ .dwg; (c) Bản vẽ graphite trong Abaqus; (d) Bản vẽ pearlite trong Abaqus

3.2. Các thông số của vật liệu trong mô hình mô phỏng

Trong mô hình mô phỏng này, giả thiết rằng perlite và graphite có tính đẳng hướng. Mô hình biến dạng dẻo và tiêu chuẩn phá hủy vật liệu được mô tả bằng phương trình biến dạng dẻo Johnson-Cock [4] (Phương trình 1) và tiêu chuẩn phá hủy cắt Johnson-Cock [5] (Phương trình 2). Các tham số biến dạng dẻo của perlite được coi như giống với thép cacbon có tỉ lệ perlite xấp xỉ 100% và lấy từ [1]. Các tham số phá hủy cắt Johnson-Cock được lấy theo thép AISI 1045 [1] và coi đó như các giá trị gần đúng của perlite. Các tham số biến dạng dẻo và phá hủy cắt của graphite được lấy từ [1].

Chúng không được xác định bằng thực nghiệm do các tác giả cho rằng biến dạng dẻo của gang không nhạy cảm với các giá trị đó và chúng cho kết quả phù hợp. Các tham số biến dạng dẻo và phá hủy cắt của perlite và graphite được trình bày trong Bảng 2 và 3.

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

$$\varepsilon_f = \left(D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) \right) \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (2)$$

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; ε_f là biến dạng phá hủy tương đương; σ_m là áp suất thủy tĩnh, giá trị trung bình của ba ứng suất pháp tuyến, và $\bar{\sigma}$ là ứng suất tương đương von Mises; D_1 , D_2 , D_3 , D_4 và D_5 là các hằng số vật liệu trong mô hình phá hủy.

Tiêu chuẩn bóc tách phôi, bao gồm tiêu chuẩn bắt đầu và tiếp diễn phá hủy được sử dụng để thực hiện bóc tách vật liệu tại lưỡi cắt. Tiêu chuẩn bắt đầu phá hủy dựa trên định luật phá hủy tích lũy như trong phương trình (3).

$$\omega = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{\varepsilon_f} \quad (3)$$

Trong đó, ω là hệ số phá hủy tích lũy vô hướng, $\Delta \bar{\varepsilon}$ là gia số biến dạng dẻo tương đương, ε_f là biến dạng phá hủy tương đương. Khi giá trị của ω đạt đến 1, hiện tượng phá hủy bắt đầu xảy ra.

Bảng 2. Các tham số biến dạng dẻo Johnson-Cook của pearlite và graphite

Tham số	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	T _m (°C)	T _r (°C)
Pearlite	550	600	0,54	0,035	0,937	1800	20
Graphite	125	400	0,155	0,032	0,9	3860	20

Bảng 3. Các tham số phá hủy cắt Johnson-Cook của pearlite và graphite

Tham số	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
Pearlite	0,05	4,22	- 2,73	0,0018	0,55
Graphite	0,2	0,6	3	- 0,02	0,6

3.3. Mô hình tương tác giữa graphite và vật liệu nền

Mô hình mô phỏng bảo toàn dịch chuyển tại bề mặt tiếp xúc giữa hai vật liệu thành phần để ngăn ngừa sự tách rời của chúng nhưng không bảo toàn ứng suất tại đó. Việc xác định bề mặt tiếp xúc giữa graphite và perlite là để ngăn ngừa sự tách rời hoặc thâm nhập lẫn nhau của hai vật liệu đó. Do không có sự tách rời graphite khỏi vật liệu nền nên trong các mẫu, độ bền bề mặt tiếp xúc giữa graphite với vật liệu nền được coi là có giá trị bằng độ bền của graphite. Trong mô phỏng, có thể sử dụng điều kiện ràng buộc TIE (Tie Constraint) để ngăn chặn sự tách rời của hai vật liệu này [6]. Tuy nhiên, do phá hủy có thể xảy ra từ bên trong hạt graphite, nên việc xác định ràng buộc TIE tại bề mặt tiếp xúc không ngăn cản sự phá hủy của các phần tử graphite gần với bề mặt đó, phù hợp với sự tách rời của graphite từ vật liệu nền trong thực tế. Quy trình này đã đơn giản hóa mô hình do không phải đưa thêm các phần tử mới vào bề mặt tiếp xúc.

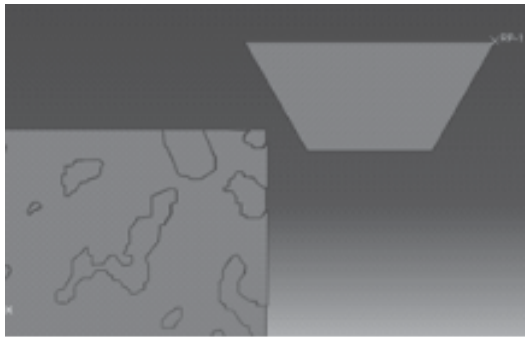
3.4. Mô hình mô phỏng và các điều kiện biên

Mô hình phần tử hữu hạn hai chiều được sử dụng trong nghiên cứu như trong

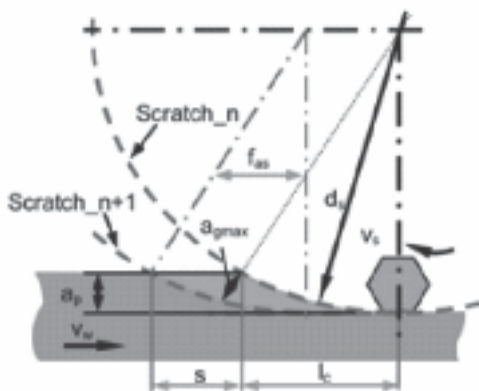
Hình 3. Mẫu GJV-450 có chiều dài 310 μm và chiều cao 100 μm . Quá trình mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm ABAQUS/Explicit dựa trên thuật toán Lagrange. Phôi được chia thành các phần tử tam giác biến dạng phẳng ba nút tuyến tính (CPE3). Hạt mài cBN được mô hình hóa thành một nửa hình lục giác đều với góc thoát phoi là -30° như trong Hình 3. Chiều sâu cắt được lấy bằng chiều dày phoi không biến dạng (a_{gmax}). Phôi được cố định theo hai phương X và Y, trong khi đó hạt mài cBN được coi là tuyệt đối cứng, di chuyển theo phương X với vận tốc bằng vận tốc cắt v_c .

Trong quá trình mài, chiều dài cung tiếp xúc l_c giữa phôi GJV-450 và hạt mài cBN được mô tả bằng phương trình (4) [8], trong đó a_p là chiều sâu cắt và d_s là đường kính ngoài của đá mài (Hình 4). Từ phương trình này có thể thấy, giá trị của l_c dao động từ 0,71 đến 1,23 mm, lớn hơn từ 2,5 đến 4 lần chiều dài phôi (310 μm) theo phương X. Do đó, chuyển động của hạt mài theo phương X có thể được coi là một đường thẳng trong mô hình này. Ngoài ra, chiều dày phoi không biến dạng (a_{gmax}) được chọn làm chiều sâu cắt (thay cho chiều sâu cắt thực a_p) như trong phương trình (5), trong đó v_w là lượng tiến dao, v_c là tốc độ cắt [8].





Hình 3. Mô hình 2D khi mài phẳng bằng một hạt mài



Hình 4. Sơ đồ mài của một hạt mài [7]

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

$$a_{gmax} = 2\pi \cdot d_s \cdot \frac{v_w}{v_c} \sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \quad (5)$$

Trong mô phỏng này, ma sát giữa hạt mài cBN và bề mặt phôi GJV-450 được mô tả bằng Định luật Coulomb như trong Phương trình (6), trong đó τ_f là ứng suất ma sát, μ là hệ số ma sát và σ_n là ứng suất pháp tuyến [9]. Hệ số ma sát được tính toán theo tỷ lệ lực mài F_t/F_n thu được từ các thí nghiệm (lần lượt là 0,3 và 0,15 khi mài khô và mài ướt) [4].

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

3.5. Kiểm nghiệm lại lực cắt mô phỏng

Để kiểm nghiệm lại độ tin cậy của mô hình cắt, các lực cắt mô phỏng của một hạt mài (bao gồm lực cắt pháp tuyến f_n và lực cắt tiếp tuyến f_t) được so sánh với lực cắt thực nghiệm của một hạt mài ở một số chế độ cắt nhất định. Lực cắt thực nghiệm của một hạt mài (f_n và f_t) được tính theo công thức sau [9]:

$$\begin{aligned} f_n &= F_n / N_d \cdot b \cdot l_c \\ f_t &= F_t / N_d \cdot b \cdot l_c \end{aligned} \quad (7)$$

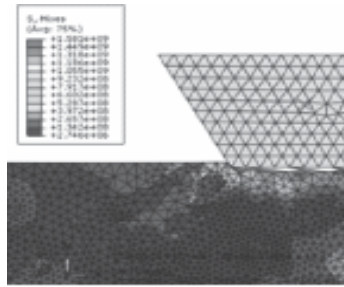
Trong đó, F_n và F_t là lực cắt pháp tuyến và lực cắt tiếp tuyến thực nghiệm; b là chiều rộng mài ($b = 4,5 \text{ mm}$); l_c là chiều dài cung tiếp xúc giữa đá mài và phôi; N_d là mật độ hạt mài tham gia cắt gọt, ($N_d = 12,5 \text{ hạt/mm}^2$), tính được sau khi quan sát bề mặt của đá mài qua kính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

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

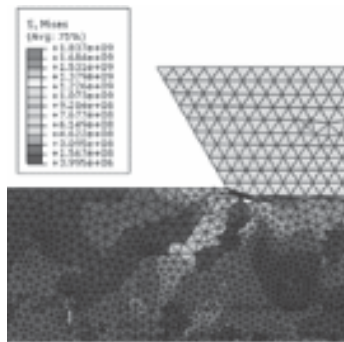
4.1. Mô phỏng quá trình hình thành phoi

Quá trình mài bao gồm ba giai đoạn chính: cạo sát, cày xới và tạo phoi. Quá trình mô phỏng cho thấy ba giai đoạn này khi mài gang nén GJV-450 bằng một hạt mài cBN như trong Hình 5. Giai đoạn cạo sát xảy ra khi chiều sâu cắt khá nhỏ cùng biến dạng dẻo trên bề mặt phôi (Hình 5a). Khi chiều sâu cắt tăng lên, giai đoạn cày xới bắt đầu, cùng với biến dạng dẻo và bề mặt mẫu hơi phồng lên (Hình 5b). Trong các giai đoạn cạo sát và cày xới, vật liệu phôi không thể được bóc gọt do chiều sâu cắt nhỏ hơn chiều sâu hình thành phoi tới hạn. Khi chiều sâu cắt đạt tới giá trị chiều sâu hình thành phoi tới hạn thì phoi được tạo ra và tách khỏi bề mặt phôi (Hình 5c). Như vậy, có thể thấy rằng có một giá trị gọi là chiều sâu hình thành phoi tới hạn, sao cho khi chiều sâu cắt nhỏ hơn giá trị đó thì hạt mài chỉ cạo sát và cày xới trên bề

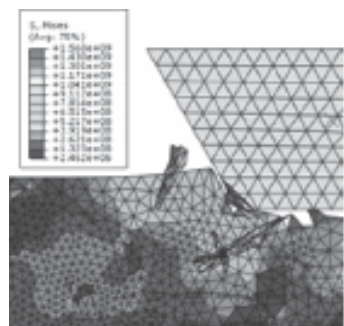
mặt phôi mà không tạo thành phoi. Phoi hình thành trong mô phỏng này là phoi dạng tấm đứt đoạn. Dạng phoi này phù hợp với các nghiên cứu đã được công bố [5].



(a) Cọ xát



(b) Cày xới



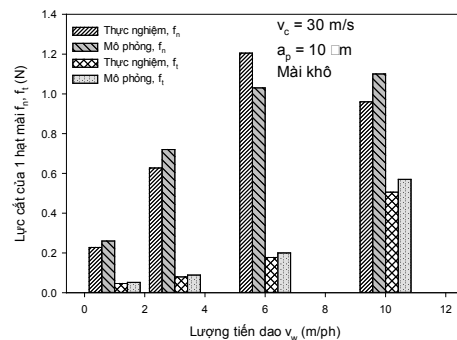
(c) Tạo phoi

Hình 5. Mô phỏng ba giai đoạn mài khi mài gang nén GJV-450 bằng một hạt mài

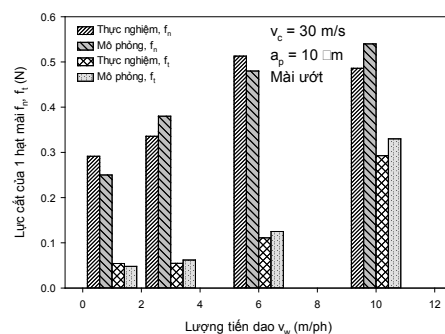
4.2. Mô phỏng lực cắt

Hình 6 mô tả lực cắt của một hạt mài trong các điều kiện mài khác nhau (lượng tiến dao v_w là 1, 3, 6 và 10 m/phút, chiều sâu cắt a_p

không đổi là 10 μm trong hai môi trường mài khô và 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 bước tiến dao bằng 3 m/ph trong môi trường mài khô, lực cắt f_n thực nghiệm và mô phỏng tương ứng là 0,6272 và 0,72 N (sai lệch 14,8%), còn lực cắt f_t lần lượt là 0,0796 và 0,089 N (sai số 11,7%). Do vậy, sai số giữa lực cắt mô phỏng và thực nghiệm khi mài phẳng gang nén GJV-450 là tương đối nhỏ, từ 1~15% (< 15%). Quá trình mô phỏng cho thấy, lực cắt tăng khi tăng 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 [10].



(a)



(b)

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

5. KẾT LUẬN

Từ các kết quả và thảo luận thu được từ nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng quá trình mài phẳng gang nén GJV-450 bằng đá mài cBN, có thể rút ra các kết luận sau:

- Quá trình mô phỏng cho thấy ba giai đoạn chính của quá trình mài là cạo xước, cày xới và tạo phoi. Kiểu phoi được hình thành là phoi dạng tấm đứt đoạn.

- Quá trình thực nghiệm và mô phỏng thể hiện xu hướng lực mài tăng khi tăng lượng tiến dao. Sai số lớn nhất giữa lực mài thực nghiệm và lực mài mô phỏng là 15%. Do đó, mô hình phần tử hữu hạn trên có thể được sử dụng để dự đoán lực mài khi gia công vật liệu này.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được thực hiện với sự hỗ trợ tài chính từ Trường Đại học Điện lực (EPU) theo mã số ĐTKHCN.11/2025. Chúng tôi cũng xin bày tỏ lòng biết ơn đối với Khoa Cơ khí - Ô tô và Xây dựng, Trường Đại học Điện lực vì đã hướng dẫn và đóng góp chuyên môn. ❖

Ngày nhận bài: 10/3/2026

Ngày phản biện: 25/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. F. Meng, Z. Zhang, J. Feng, Q. Gu, B. Wu, J. Wang, “A study investigating the cutting mechanism of compacted graphite iron based on a novel microstructure of finite element model”. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 81, pp. 250-260, 2022.
- [2]. J. Niu, C. Huang, Z. Shi, H. Liu, Z. Tang, R. Su, Z. Chen, B. Li, Z. Wang, L. Xu, “A chip formation mechanism taking into account microstructure evolution during the cutting process: Taking compacted graphite iron machining as an example”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 198, pp. 104-150, 2024.
- [3]. W. M. Mohammed, E. Ng, M. A. Elbestawi, “Modeling the effect of the microstructure of compacted graphite iron on chip formation”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 51, pp. 753-765, 2011.
- [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*, vol. 81, pp. 995-1005, 2015.
- [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*, vol. 91, pp. 3591-3602, 2017.
- [6]. W. M. Mohammed, Eu-Gene Ng, M. A. Elbestawi, “On stress propagation and fracture in compacted graphite iron”. *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 56, pp. 233-244, 2011.
- [7]. S. Malkin and C. Guo, “Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives”. 2nd ed, New York: Industrial Press, 2008.
- [8]. 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*, vol. 100, pp. 153-165, 2019.
- [9]. 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*, vol. 77, pp. 529-532, 2018.
- [10]. 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*, vol. 77, pp. 525-528, 2018.