

MÔ PHỎNG SỐ QUÁ TRÌNH TIỆN KHÔ THÉP C45 BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN: PHÂN TÍCH TRƯỜNG NHIỆT ĐỘ, TRƯỜNG ỨNG SUẤT VÀ CÂN BẰNG NĂNG LƯỢNG

FINITE ELEMENT SIMULATION OF DRY TURNING OF C45 STEEL:
ANALYSIS OF TEMPERATURE FIELD, STRESS DISTRIBUTION AND ENERGY BALANCE

Bùi Tuấn Anh^{1,*}, Nguyễn Việt Tùng¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huinh5804.2026.161>

TÓM TẮT

Trong xu hướng sản xuất xanh, tiện khô được ứng dụng rộng rãi nhằm giảm chi phí và hạn chế tác động môi trường từ dung dịch trơn nguội, song lại làm gia tăng nhiệt tại vùng cắt, ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt và tuổi thọ dụng cụ. Nghiên cứu này xây dựng mô hình phần tử hữu hạn ba chiều trong Abaqus/Explicit với phương trình Johnson-Cook để mô phỏng quá trình tiện khô thép C45. Kết quả cho thấy nhiệt độ cực đại tại giao diện dao - phôi đạt 634°C, tiệm cận ngưỡng an toàn của hợp kim cứng WC-Co, trong khi nhiệt dư trên bề mặt phôi duy trì ở mức 370 - 380°C. Phân tích năng lượng khẳng định biến dạng dẻo chiếm ~90% tổng nhiệt năng phát sinh (ALLPD ≈ 500J so với ALLFD ≈ 40 - 50J). Ứng suất Von Mises cực đại đạt 1140MPa, phản ánh hiệu ứng hóa bền biến dạng tốc độ cao. Từ kết quả, nghiên cứu đề xuất áp dụng bôi trơn lượng tối thiểu (MQL) với lưu lượng 50 - 100ml/h và áp suất khí 4 - 5 bar như giải pháp kiểm soát nhiệt vùng cắt, nâng cao chất lượng gia công thép C45 theo định hướng sản xuất xanh.

Từ khóa: Mô phỏng số; tiện khô; Thép C45; mô hình Johnson-Cook; trường nhiệt độ; cân bằng năng lượng; Abaqus/Explicit.

ABSTRACT

In the context of green manufacturing, dry turning has been increasingly adopted to reduce costs and minimize environmental impacts associated with cutting fluids, but it also intensifies heat generation in the cutting zone, adversely affecting surface quality and cutting tool life. This study develops a three-dimensional finite element model in Abaqus/Explicit using the Johnson-Cook constitutive equation to simulate dry turning of C45 steel. Results indicate that the maximum temperature at the tool-chip interface reaches 634°C, approaching the safety threshold of WC-Co carbide, while residual surface temperature remains at 370 - 380°C. Energy balance analysis reveals that plastic deformation accounts for ~90% of total heat generation (ALLPD ≈ 500J compared to ALLFD ≈ 40 - 50J). The maximum Von Mises stress reaches 1140MPa, highlighting the strain-hardening effect under high strain rates. Based on these findings, the study proposes applying minimum quantity lubrication (MQL) at a flow rate of 50 - 100 ml/h and an air pressure of 4 - 5 bar as a feasible solution to control the cutting zone temperature and improve the machining quality of C45 steel under green manufacturing practices.

Keywords: Numerical simulation; dry turning; C45 steel; Johnson-Cook model; temperature field; energy balance; Abaqus/Explicit.

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: anh.buituan@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 27/3/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 30/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Gia công cắt gọt kim loại, đặc biệt là nguyên công tiện, giữ vai trò trọng yếu trong sản xuất cơ khí hiện đại. Trong

quá trình tiện, biến dạng dẻo vùng cắt và ma sát tại các bề mặt tiếp xúc là hai nguồn sinh nhiệt chủ yếu, ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bề mặt, tính toàn vẹn bề

mặt và tuổi bền dụng cụ cắt [1-3]. Nhiệt độ cao tại vùng cắt có thể kích hoạt cơ chế tái kết tinh cục bộ, hình thành ứng suất dư kéo nguy hiểm và làm suy giảm độ cứng lớp bề mặt - các yếu tố kiểm soát trực tiếp tuổi bền mỏi của chi tiết máy.

Xu hướng sản xuất xanh hiện nay thúc đẩy việc áp dụng phương pháp tiện khô (dry turning) nhằm loại bỏ chi phí và ô nhiễm môi trường từ dung dịch trơn nguội. Tuy nhiên, việc cắt khô dẫn đến nhiệt tích tụ tại vùng cắt không được tản đi hiệu quả. Leppert và Peng xác nhận rằng tiện khô làm gia tăng ứng suất dư kéo trên bề mặt thép C45 so với gia công ướt [1]. Santos và cộng sự nghiên cứu thực nghiệm quá trình tiện khô bên trong thép C45 ở các trạng thái nhiệt luyện khác nhau, cung cấp dữ liệu chuẩn về hình thái phoi và độ nhám bề mặt [2]. Nguyễn Bá Thuận đã xác định sự phụ thuộc của chiều sâu lớp biến cứng bề mặt vào chế độ cắt khi tiện CNC thép C45 [3], trong khi Malotová và cộng sự đo phân bố ứng suất dư bằng nhiễu xạ tia X để đánh giá định lượng tác động của điều kiện cắt đến tính toàn vẹn bề mặt [4]. Rajaguru và cộng sự ứng dụng phương pháp CEL trong Abaqus để dự đoán ứng suất dư trong gia công trục giao, cho thấy CEL khắc phục nhược điểm biến dạng lưới quá mức so với phương pháp Lagrangian truyền thống, với sai số lực cắt 6,8% so với thực nghiệm [5].

Song song với nghiên cứu thực nghiệm, mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong phân tích quá trình cắt gọt nhờ khả năng cung cấp thông tin chi tiết về trường ứng suất, nhiệt độ và năng lượng mà đo lường trực tiếp khó thực hiện. Từ mô hình FEM giải bài toán cắt gọt trục giao của Shet và Deng [6], đến mô hình 2D dự đoán lực cắt và hình thành phoi thép AISI 1045 của Özel và Zeren [7], các công cụ mô phỏng FEM đã được hoàn thiện đáng kể. Sandu và cộng sự ứng dụng FEM phân tích trường nhiệt độ và ứng suất khi tiện thép C45, làm rõ phân bố nhiệt tại vùng cắt [8]. İynen và cộng sự trình bày quy trình mô phỏng 3D tiện phôi trụ bằng Abaqus/Explicit [9], tạo nền tảng phương pháp cho nghiên cứu hiện tại. Veerappan, Seikh và cộng sự ứng dụng lưới thích nghi FEM để dự đoán phân bố nhiệt độ, lực cắt và mài mòn dụng cụ [10].

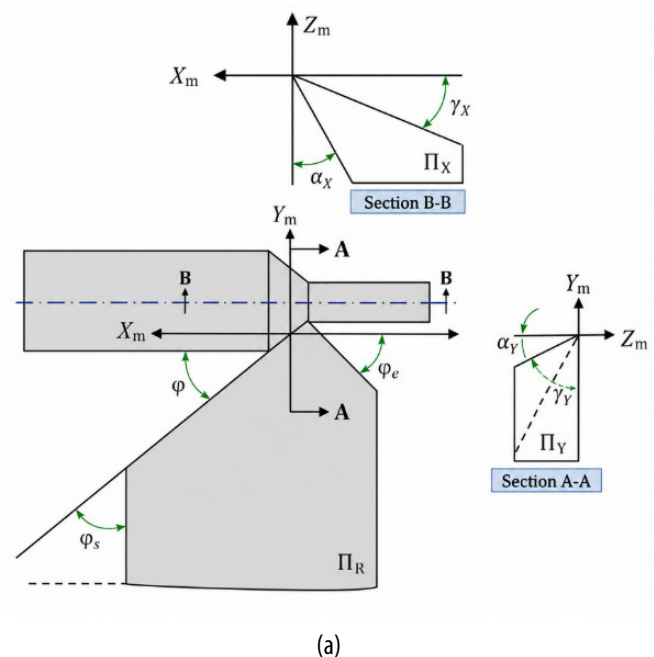
Độ tin cậy của kết quả mô phỏng phụ thuộc trực tiếp vào độ chính xác của phương trình trạng thái vật liệu. Abed và cộng sự đặc trưng hóa ứng suất chảy và hành vi phá hủy của thép C45 trên dải nhiệt độ rộng (200 - 700°C) và tốc độ biến dạng rất lớn, cung cấp cơ sở dữ liệu tin cậy cho mô hình Johnson-Cook [11]. Duan và cộng sự ứng

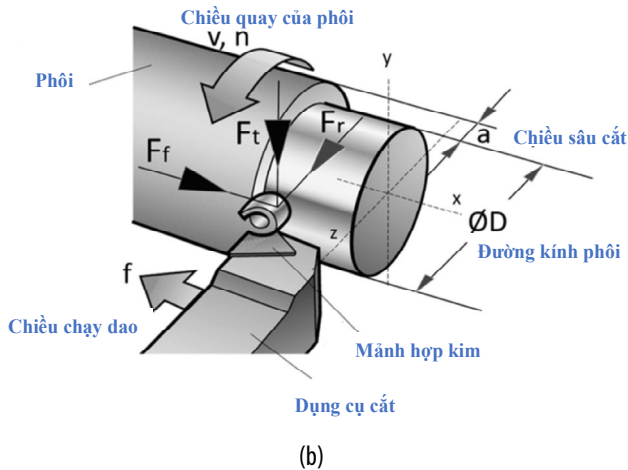
dụng mô hình này để mô phỏng cơ chế đứt gãy và hình thái phoi răng của khi gia công tốc độ cao thép AISI 1045 [12]. Qiu và cộng sự phân tích độ nhạy của năm hằng số vật liệu Johnson-Cook và hệ số ma sát đối với kết quả dự đoán lực cắt, nhiệt độ và ứng suất dư [13], cho thấy các tham số A, B và m có ảnh hưởng chi phối nhất. Löschner và cộng sự mở rộng phân tích độ nhạy này cho hợp kim Ti6Al4V, khẳng định tính phổ biến của phương pháp [14]. Priest và cộng sự đề xuất biến thể Johnson-Cook hiệu chỉnh đa thức để mô tả chính xác hơn hiện tượng mềm hóa nhiệt cục bộ của thép C45 [15].

Mặc dù có nhiều nghiên cứu mô phỏng FEM về tiện thép C45, tuy nhiên ít công trình nào đồng thời (i) phân tích định lượng cân bằng năng lượng để làm rõ tỷ lệ đóng góp của biến dạng dẻo và ma sát bề mặt vào tổng nhiệt lượng sinh ra, (ii) đánh giá tác động của nhiệt dư bề mặt đến tính toàn vẹn lớp bề mặt phôi, và (iii) dựa trên bằng chứng cân bằng năng lượng để đề xuất chiến lược làm mát MQL có căn cứ định lượng. Bài báo này lấp đầy khoảng trống đó bằng cách xây dựng mô hình FEM 3D mô phỏng tiện khô thép C45 trong Abaqus/Explicit, tích hợp phương trình trạng thái và tiêu chuẩn phá hủy Johnson-Cook, với các mục tiêu cụ thể: (1) xác định phân bố ứng suất và trường nhiệt độ trong vùng cắt; (2) định lượng tỷ lệ chuyển hóa giữa năng lượng biến dạng dẻo và năng lượng ma sát; (3) đánh giá ảnh hưởng của điều kiện tiện khô đến tính toàn vẹn bề mặt phôi; và (4) đề xuất giải pháp công nghệ MQL có căn cứ khoa học.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Nhiệt động lực học của quá trình cắt gọt





Hình 1. Các thông số khi tiện chi tiết dạng trụ: (a) Các thông số dụng cụ cắt; (b) Các thông số quá trình cắt [10]

Trong quá trình tiện, khi lưỡi cắt xâm nhập vào phôi, vật liệu bị ép dãn về phía trước, trạng thái ứng suất chuyển từ đàn hồi sang dẻo và gây ra sự trượt vĩ mô dọc theo các mặt tinh thể. Thông số dụng cụ cắt và quá trình cắt được thể hiện trên hình 1. Theo mô hình ba vùng biến dạng kinh điển, vùng cắt được phân chia thành:

Vùng biến dạng chính (Khu vực I): Mặt phẳng trượt chính nơi lớp kim loại nguyên bản bị biến dạng dẻo lớn nhất để tách ra thành phôi. Nhiệt lượng sinh ra Q_{dh} được tính thông qua công ma sát nội bộ:

$$Q_{dh} = F_s \cdot V_s \quad (1)$$

trong đó, F_s là lực theo phương trượt và V_s là vận tốc trượt. Vùng này đóng góp phần lớn nhất vào tổng nhiệt lượng sinh ra, tương ứng với năng lượng ALLPD trong mô phỏng.

Vùng biến dạng thứ cấp (Khu vực II): Bề mặt tiếp xúc giữa phôi mới hình thành và mặt trước của dao. Tại đây sinh ra lượng nhiệt Q_{dm} do ma sát ngoài và biến dạng cắt thứ cấp, tương ứng với thành phần ALLFD trong mô phỏng.

Vùng biến dạng phụ (Khu vực III): Bề mặt tiếp xúc giữa mặt sau dao và bề mặt chi tiết đã gia công, sinh ra nhiệt ma sát Q_{ms} . Tại đây, nhiệt dư lưu giữ trên bề mặt phôi có thể gây biến đổi tổ chức tế vi và hình thành ứng suất dư.

Phương trình cân bằng nhiệt cắt tổng quát:

$$Q = Q_{dh} + Q_{dm} + Q_{ms} + Q_{dp} \quad (2)$$

trong đó, Q_{dp} là năng lượng rất nhỏ dùng để tạo bề mặt mới (thường bỏ qua). Theo tài liệu thực nghiệm, phân bố nhiệt cắt xấp xỉ theo tỷ lệ: ~75% bị cuốn theo phôi, ~20% dẫn vào dụng cụ cắt, ~4% xâm nhập vào chi tiết gia công và ~1% tản ra môi trường [5, 6].

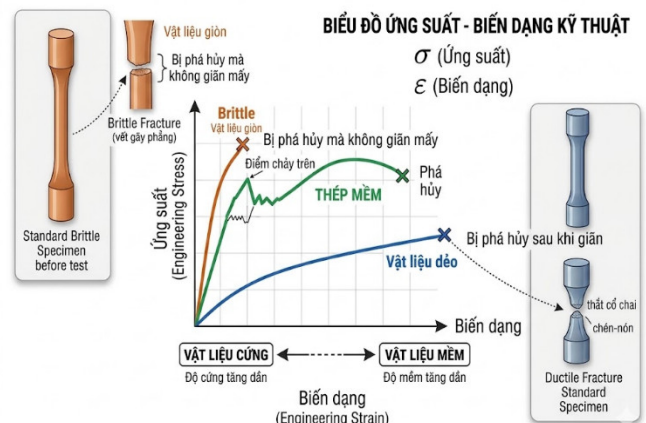
Mặc dù chỉ 4% nhiệt lượng truyền vào chi tiết, lượng nhiệt này đủ gây ra độ tăng nhiệt độ ΔT đáng kể, được ước tính theo:

$$\Delta T = Q / (\rho \cdot V \cdot C_p) \quad (3)$$

trong đó, ρ là khối lượng riêng, V là thể tích vùng ảnh hưởng nhiệt, C_p là nhiệt dung riêng. Sự gia tăng nhiệt độ này dẫn trực tiếp đến giãn nở nhiệt và sai lệch kích thước gia công $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$.

2.2. Mô hình vật liệu Johnson-Cook

Mô hình Johnson-Cook (JC) được lựa chọn là phương trình trạng thái phù hợp nhất cho bài toán tiện tốc độ cao nhờ khả năng tích hợp đồng thời ba cơ chế: hóa bền biến dạng, độ nhạy tốc độ biến dạng và mềm hóa nhiệt (hình 2). Ứng suất chảy tương đương σ theo mô hình JC được biểu diễn:



Hình 2. Biểu đồ ứng suất biến dạng của vật liệu

$$\bar{\sigma} = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 - T^{*m}) \quad (4)$$

Ý nghĩa vật lý từng cụm trong công thức (4):

$(A + B\epsilon^n)$: Hóa bền biến dạng dẻo. A là giới hạn chảy ban đầu (ứng suất chảy tại biến dạng bằng 0), B là hệ số hóa bền và n là số mũ hóa bền. Với thép C45, A = 553MPa, B = 600MPa, n = 0,234.

$\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right]$: Độ nhạy tốc độ biến dạng. C là hằng số vật liệu; $\epsilon^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ là tỷ số tốc độ biến dạng tức thời với tốc độ tham chiếu ($\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$). Với C = 0,013, thép C45 thể hiện độ nhạy tốc độ tương đối thấp so với thép hợp kim khác.

$(1 - T^{*m})$: Mềm hóa nhiệt. $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$ là nhiệt độ vô thứ nguyên; m = 1,0 là số mũ mềm hóa nhiệt.

Tại $T = T_m = 1460\text{K}$ (1187°C), ứng suất chảy tiệm cận về 0, mô tả trạng thái nóng chảy.

Tiêu chuẩn phá hủy dẻo Johnson-Cook mô tả sự tích lũy hư hỏng:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_f^{pl}}{\epsilon_f^{pl}} \quad (5)$$

Vật liệu tại điểm lưới bị phá hủy (tách phoi) khi $D \geq 1$. Biến dạng dẻo tại thời điểm đứt gãy:

$$\epsilon_f^{pl} = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [1 + D_5 T^*] \quad (6)$$

với $\eta = \sigma_m / \sigma$ là tỷ số ứng suất thủy tĩnh/Von Mises, phản ánh trạng thái ứng suất đa trục tại vùng biến dạng trước mũi dao. Các hằng số phá hủy $D_1 = 0,05$; $D_2 = 3,44$; $D_3 = -2,12$; $D_4 = 0,002$; $D_5 = 0,61$ được xác định từ thực nghiệm [11].

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Bài toán tiện kim loại được giải bằng Abaqus/Explicit sử dụng phương pháp sai phân trung tâm. Phương pháp tích phân thời gian tường minh được lựa chọn thay cho phương pháp ẩn vì bài toán liên quan đến biến dạng lớn tốc độ cao, tiếp xúc phi tuyến và phá hủy vật liệu - những đặc điểm khiến phương pháp implicit kém hiệu quả do phải lặp hội tụ trong mỗi bước thời gian.

3.1. Mô hình hình học và giả thiết tính toán

Mô hình 3D được xây dựng với các giả thiết: vật liệu đồng nhất và đẳng hướng; bỏ qua mài mòn dao; bỏ qua biến dạng đàn hồi của hệ thống công nghệ; bề mặt tiếp xúc dao - phôi tuân theo luật ma sát Coulomb. Dao tiện được thiết kế với các thông số theo [9] (bảng 1), với bán kính bo mũi dao 0,3mm để tránh điểm kỳ dị toán học. Phôi được thiết kế dạng trụ $D = 50\text{mm}$, chiều dài vùng khảo sát 30mm, chiều sâu bóc tách phoi $a_p = 1\text{mm}$.

Bảng 1. Thông số hình học của dao tiện (thiết lập theo [9])

Thông số hình học	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Góc trước	γ	10°	—
Góc sau	α	10°	—
Góc cắt	δ	80°	—
Bán kính bo mũi dao	r	0,3	mm

Theo bảng 1, bán kính bo mũi dao $r = 0,3\text{mm}$ được lựa chọn nhằm tránh điểm kỳ dị ứng suất tại mũi dao đồng thời phản ánh điều kiện mòn thực tế của dụng cụ sau mài. Thông số vật liệu dao và phôi được trình bày chi tiết trong mục tiếp theo.

3.2. Thông số vật liệu

Vật liệu phôi thép C45 được khai báo đầy đủ tính chất đàn hồi, nhiệt động học và hành vi đàn dẻo (năng 2). Dao cắt được mô hình hóa là vật rắn cứng tuyệt đối với mô đun đàn hồi $E = 500.000\text{MPa}$ để ngăn biến dạng dao trong khi vẫn cho phép truyền nhiệt.

Bảng 2. Thông số cơ - nhiệt của thép C45

Nhóm thuộc tính	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Cơ học đàn hồi	Khối lượng riêng	ρ	7850	kg/m^3
	Mô đun Young	E	210.000	MPa
	Hệ số Poisson	ν	0,3	—
Nhiệt học	Nhiệt dung riêng	C_p	470	$\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$
	Hệ số dẫn nhiệt	k	46	$\text{W/(m}\cdot\text{K)}$
	Hệ số giãn nở nhiệt	α	$1,2 \times 10^{-5}$	1/K

Bảng 3. Hằng số mô hình Johnson-Cook và tiêu chuẩn phá hủy dẻo cho thép C45 [11]

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Giới hạn chảy ban đầu	A	553	MPa
Hệ số hóa bền	B	600	MPa
Số mũ hóa bền	n	0,234	—
Hệ số nhạy tốc độ	C	0,013	—
Số mũ mềm hóa nhiệt	m	1,0	—
Nhiệt độ nóng chảy	T_m	1460	K
Nhiệt độ tham chiếu	T_0	298	K
Tốc độ biến dạng tham chiếu	$\dot{\epsilon}_0$	1	s^{-1}
Hằng số phá hủy	D_1	0,05	—
	D_2	3,44	—
	D_3	-2,12	—
	D_4	0,002	—
	D_5	0,61	—

3.3. Điều kiện biên, tải trọng và chia lưới

Điều kiện tiếp xúc dao - phôi được mô hình hóa bằng thuật toán General Contact với mô hình ma sát Coulomb hệ số $\mu = 0,3$. Giá trị này nằm trong dải khuyến nghị 0,2 - 0,4 cho cặp vật liệu hợp kim cứng - thép carbon trung bình trong điều kiện khô [8, 9]. Hệ số phân mảnh nhiệt của biến dạng không đàn hồi (Inelastic Heat Fraction) $\eta = 1,0$ (toàn bộ công biến dạng dẻo chuyển hóa thành nhiệt, giả thiết phổ biến trong mô phỏng FEM gia công kim loại [6, 9]). Dòng nhiệt tại giao diện tiếp xúc được phân bổ theo tỷ lệ 50/50 giữa bề mặt dao và bề mặt phôi.

Phôi được gán vận tốc góc $\omega = 150\text{rad/s}$, tương ứng tốc độ cắt $v_c = 225\text{ m/phút}$ tại $D = 50\text{mm}$. Dao tịnh tiến với vận tốc $0,03\text{m/s}$ dọc trục phôi, tương ứng $f = 1,257\text{ mm/vòng}$. Thời gian bước mô phỏng $t = 0,05\text{s}$ tương ứng $\sim 1,2$ vòng quay. Kỹ thuật mass scaling với $\Delta t = 5 \times 10^{-6}\text{s}$ được áp dụng để giảm chi phí tính toán, với điều kiện tỷ lệ năng lượng động học (ALLKE/ALLIE) không vượt quá 5% để đảm bảo tính chính xác bán tĩnh [9]. Bảng 4 tổng hợp chế độ cắt.

Bảng 4. Thông số chế độ cắt trong mô phỏng

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Tốc độ cắt	v_c	225	m/phút
Lượng chạy dao	f	1,257	mm/vòng
Chiều sâu cắt	a_p	1	mm
Tiết diện cắt	$A_c = a_p \cdot f$	1,257	mm^2
Tốc độ quay phôi	n	1432	vòng/phút
Thời gian mô phỏng	t	0,05	s
Hệ số ma sát Coulomb	μ	0,3	—

Lưới phần tử được xây dựng theo chiến lược chia lưới thích nghi cục bộ. Vùng bóc tách phoi và biến dạng dẻo lớn sử dụng phần tử nhiệt - cơ khối C3D8RT (8 nút, tích phân giảm, liên hợp nhiệt - cơ), với kích thước phần tử nhỏ nhất $\sim 0,05\text{mm}$ tại mặt phẳng trượt chính. Tổng số phần tử phôi là 77.064. Dao sử dụng phần tử C3D4T (tứ diện 4 nút) với ~ 12.000 phần tử tập trung tại vùng mũi dao. Toàn bộ lưới được kiểm tra theo tiêu chí Jacobian và tỷ lệ cạnh để đảm bảo hội tụ số.

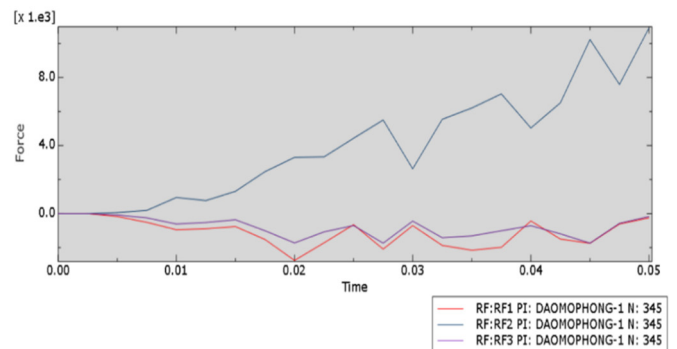
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Lực cắt và trường ứng suất

Kết quả lực phản ứng cho thấy quá trình hình thành phoi ổn định bắt đầu từ $t = 0,015\text{s}$. Ba thành phần lực cắt đạt trạng thái ổn định với: lực cắt chính tiếp tuyến $F_c \approx 10.000\text{N}$; lực dọc trục $F_f \approx 1.500 - 2.000\text{N}$; lực hướng kính $F_r \approx 2.500 - 3.000\text{N}$ (hình 3). Tỷ lệ xấp xỉ $F_c : F_f : F_r \approx 4 : 0,7 : 1$, phù hợp với lý thuyết cắt gọt kim loại.

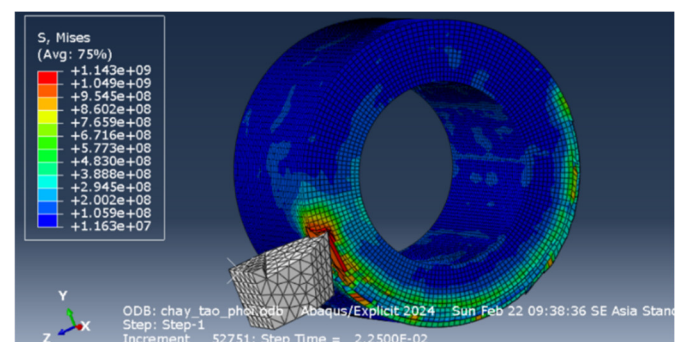
Lực cắt trong mô phỏng: Theo công thức kinh điển $F_c = k_s \cdot A_c$ với tiết diện cắt $A_c = 1,257\text{mm}^2$, lực cắt lý thuyết ước tính trong khoảng $3.100 - 4.400\text{N}$ ($k_s \approx 2.500 - 3.500\text{MPa}$ cho thép C45 [11]). Giá trị mô phỏng $F_c \approx 10.000\text{N}$ cao hơn đáng kể so với ước tính lý thuyết. Sự chênh lệch này có thể do hai nguyên nhân chính: (1) kỹ thuật mass scaling gây ra lực quán tính bổ sung; và (2) tốc độ biến dạng rất cao trong vùng cắt làm tăng k_s hiệu dụng theo mô hình Johnson-Cook. Để xác minh độ chính xác của mô hình, cần đo lực cắt thực nghiệm bằng

dynamometer trong điều kiện tương đương - đây là hướng ưu tiên trong nghiên cứu tiếp theo. Rajaguru và cộng sự báo cáo sai số lực cắt FEM/thực nghiệm $\sim 6,8\%$ khi dùng phương pháp CEL trong Abaqus [5], minh chứng cho tiềm năng độ chính xác cao của mô phỏng Abaqus sau khi hiệu chỉnh. Mặc dù giá trị lực cắt tuyệt đối chưa được kiểm định thực nghiệm, trường ứng suất, phân bố nhiệt độ và cân bằng năng lượng là các đại lượng mục tiêu của nghiên cứu này vẫn có giá trị phân tích độc lập với độ chính xác của lực cắt, do chúng phụ thuộc chủ yếu vào các tham số vật liệu Johnson-Cook và điều kiện nhiệt biên đã được kiểm chứng trong tài liệu [8, 9, 11].



Hình 3. Ba thành phần lực cắt trong quá trình tiện

Phân tích trường ứng suất tương đương Von Mises cho thấy giá trị cực đại đạt 1.140MPa , tập trung tại vùng phía trước mũi dao và dọc mặt phẳng trượt chính. Mức ứng suất này vượt hơn gấp đôi giới hạn chảy tĩnh $A = 553\text{MPa}$, phản ánh hiệu ứng hóa bền biến dạng và nhạy tốc độ đặc trưng của mô hình Johnson-Cook. Phân bố ứng suất này minh chứng cho mức độ biến dạng dẻo cục bộ khốc liệt diễn ra trong vùng cắt (hình 4).



Hình 4. Phân bố ứng suất tương đương Von Mises tại vùng cắt

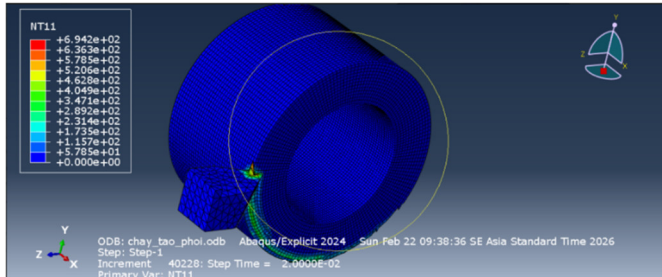
4.2. Trường nhiệt độ

Phân tích trường nhiệt độ (NT11) cho thấy gradient cực dốc từ vùng cắt ra ngoài. Nhiệt độ cực đại đạt 634°C , tập trung tại giao diện tiếp xúc mặt trước dao - phoi, nơi diễn ra biến dạng dẻo và trượt vật liệu mạnh nhất (hình 5). Có thể phân biệt ba dải nhiệt độ đặc trưng:

Vùng lõi biến dạng dẻo: 550 - 634°C, tại mặt phẳng trượt chính và giao diện mặt trước dao - phôi.

Bề mặt phôi vừa định hình: 300 - 450°C, do ma sát và truyền nhiệt từ mặt sau dao sang bề mặt gia công.

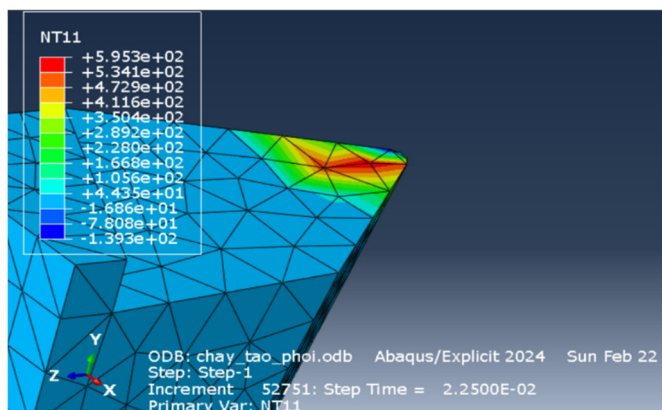
Vùng vật liệu chưa gia công: 50 - 150°C, do dẫn nhiệt từ vùng cắt vào thân phôi bị giới hạn bởi hệ số dẫn nhiệt $k = 46 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ của thép C45.



Hình 5. Phân bố nhiệt độ tại các nút của mô hình NT11

Giá trị nhiệt độ cực đại 634°C tại mặt trước dao có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Thứ nhất, nó tiệm cận ngưỡng an toàn của lớp phủ TiN/TiAlN trên dụng cụ hợp kim cứng WC-Co (~650 - 700°C) - vượt ngưỡng này lớp phủ bắt đầu oxy hóa và mất hiệu quả chống mài mòn. Thứ hai, ở 634°C thép C45 đã nằm trong vùng nhiệt độ gây tái kết tinh một phần của austenite (~700 - 730°C là nhiệt độ A_{c1}), và quá trình làm nguội nhanh tiếp theo tại bề mặt phôi có thể dẫn đến hình thành martensite cục bộ - cơ chế tạo ra "lớp trắng" đặc trưng trong gia công tốc độ cao. Thứ ba, nhiệt dư 370 - 380°C trên bề mặt phôi sau khi dao đi qua vẫn đủ để duy trì cơ chế khuếch tán nhiệt và tạo ra ứng suất dư kéo trong lớp bề mặt, phù hợp với kết quả thực nghiệm của Leppert và Peng [1] và Malotová và cộng sự [4].

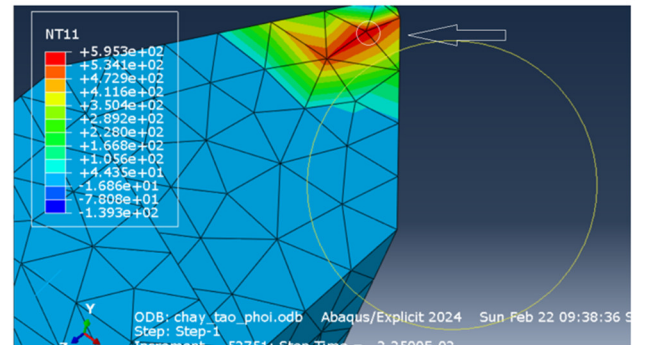
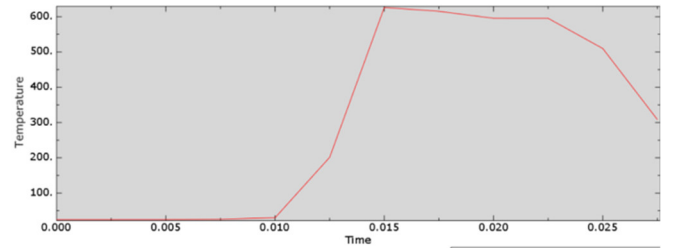
4.3. Phân bố nhiệt độ theo thời gian



Hình 6. Phân bố nhiệt độ trên mặt trước của dao tiến

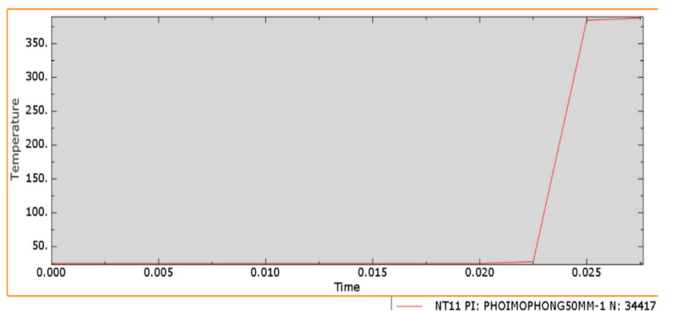
Phân bố nhiệt độ tại nút đại diện trên mặt trước dao cho thấy giá trị cực đại ~595°C và thể hiện bốn pha đặc trưng: (i) pha tiếp cận (0 - 0,01s) tại nhiệt độ phòng; (ii) pha tăng nhiệt nhanh (0,01 - 0,015s) với nhiệt độ tăng đột

ngột lên 620°C; (iii) pha ổn định (0,015 - 0,022s) dao động 580 - 620°C phản ánh trạng thái cắt bền vững; và (iv) pha giảm nhiệt khi dao thoát khỏi vùng tiếp xúc (hình 6 và 7).



Hình 7. Nhiệt độ trên nút khảo sát của dao trong một giai đoạn cắt

Tại nút đại diện trên bề mặt phôi, nhiệt độ duy trì ở mức nhiệt độ phòng cho đến khi dao tiến đến gần (~0,023s), sau đó tăng đột ngột lên 370 - 380°C do động thời tác động của biến dạng dẻo mạnh và ma sát mặt sau dao. So sánh hai lịch sử nhiệt độ khẳng định dụng cụ cắt chịu tải nhiệt cao hơn đáng kể so với bề mặt phôi, xác nhận vai trò chi phối của giao diện mặt trước dao - phôi trong việc tích tụ nhiệt năng (hình 8).



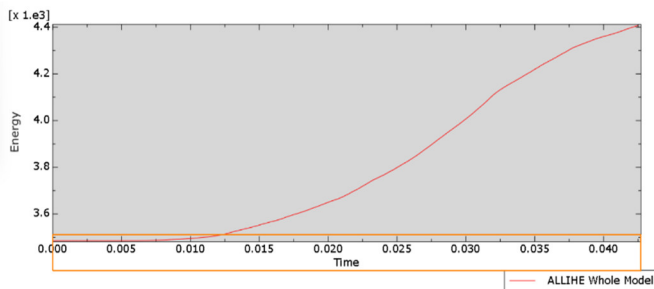
Hình 8. Biến thiên của nhiệt độ trên nút khảo sát của phôi theo thời gian

4.4. Cân bằng và chuyển hóa năng lượng

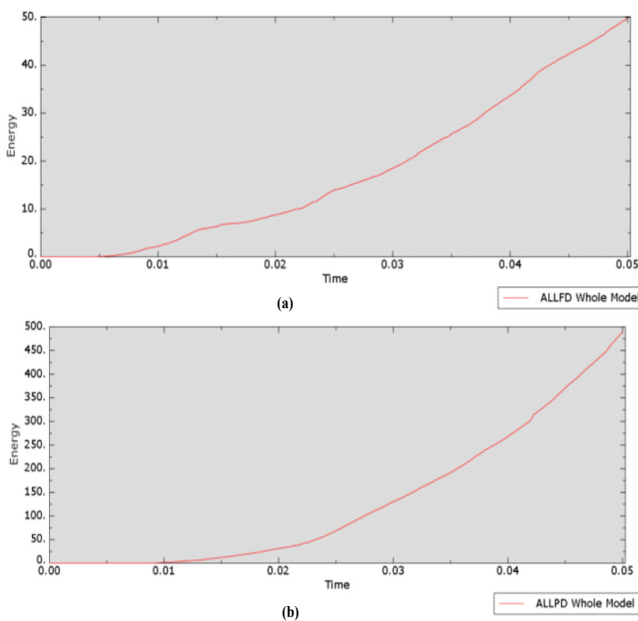
Tổng năng lượng nội nhiệt ALLIHE tăng tuyến tính theo thời gian và đạt ~4.400J vào cuối quá trình mô phỏng (hình 9), phản ánh tốc độ sinh nhiệt đều đặn trong điều kiện cắt ổn định. Sự tuyến tính của ALLIHE theo thời gian là bằng chứng gián tiếp cho việc quá trình cắt đã đạt trạng thái ổn định, đảm bảo tính đại diện của kết quả.

Phân tích định lượng cân bằng năng lượng: Năng lượng tiêu tán do biến dạng dẻo (ALLPD) đạt ~500J, trong khi

năng lượng tiêu tán do ma sát bề mặt (ALLFD) chỉ đạt 40 - 50J. Tỷ lệ ALLPD/ALLFD $\approx 10:1$ cho thấy trong quá trình tiện khô thép C45 với các thông số đã lựa chọn, cơ chế biến dạng dẻo thể tích đóng góp $\sim 90\%$ tổng nhiệt năng, còn ma sát bề mặt chỉ đóng góp $\sim 10\%$. Kết quả này có ý nghĩa quan trọng cho việc lựa chọn chiến lược làm mát: bất kỳ giải pháp nào chỉ tập trung vào giảm ma sát (ALLFD) sẽ chỉ có khả năng giảm tối đa $\sim 10\%$ tổng nhiệt lượng (hình 10). Để kiểm soát hiệu quả nhiệt vùng cắt, cần tác động đồng thời vào cơ chế biến dạng dẻo thông qua tối ưu hóa thông số công nghệ.



Hình 9. Đồ thị biến thiên năng lượng nhiệt bên trong hệ (ALLIHE) theo thời gian



Hình 10. Đồ thị biến thiên năng lượng: (a) do ma sát (ALLFD); (b) do biến dạng dẻo (ALLPD)

Bảng 5 tổng hợp các kết quả mô phỏng chính của nghiên cứu và đối chiếu với dữ liệu từ các công trình tài liệu đã công bố. Kết quả cho thấy nhiệt độ cực đại tại mặt trước dao (634°C), nhiệt độ bề mặt phôi sau gia công ($370 - 380^{\circ}\text{C}$) và ứng suất Von Mises cực đại (1.140MPa) đều nằm trong dải giá trị tham chiếu của các nghiên cứu FEM tiện thép C45 tương đương [2, 8-11], xác nhận tính nhất quán và độ tin cậy của mô hình.

Bảng 5. Tổng hợp kết quả mô phỏng chính và so sánh với tài liệu

Thông số	Giá trị mô phỏng (nghiên cứu này)	Giá trị so sánh (tài liệu)	Nguồn
Nhiệt độ cực đại tại mặt trước dao	634°C	$550 - 700^{\circ}\text{C}$ ($v_c \approx 200 - 300$ m/phút)	[8, 9, 10]
Nhiệt độ bề mặt phôi sau gia công	$370 - 380^{\circ}\text{C}$	$200 - 450^{\circ}\text{C}$ (điều kiện tương đương)	[2, 8]
Ứng suất Von Mises cực đại	1.140MPa	$900 - 1.300\text{MPa}$ (thép C45)	[8, 11]
Thời gian đạt ổn định cắt	$\sim 0,015\text{s}$	$\sim 0,01 - 0,02\text{s}$	[9]

4.5. Ảnh hưởng đến tính toàn vẹn bề mặt

Kết quả mô phỏng làm rõ các cơ chế suy giảm tính toàn vẹn bề mặt trong điều kiện tiện khô:

(1) *Nguy cơ hư hại nhiệt dụng cụ cắt*: Nhiệt độ 634°C tại mặt trước dao tiệm cận ngưỡng an toàn của hợp kim cứng WC-Co ($\sim 600 - 700^{\circ}\text{C}$). Ở nhiệt độ này, độ cứng nóng của WC-Co bắt đầu suy giảm đáng kể, làm tăng tốc độ mài mòn dính và mài mòn khuếch tán. Kết hợp với ứng suất Von Mises cực đại 1.140MPa và tải nhiệt chu kỳ lặp lại theo từng vòng quay, đây là điều kiện thuận lợi cho sự hình thành vết nứt nhiệt trên lưỡi cắt.

(2) *Ảnh hưởng đến lớp bề mặt phôi*: Nhiệt dư $370 - 380^{\circ}\text{C}$ trên bề mặt phôi sau khi dao đi qua, kết hợp với tốc độ làm nguội nhanh, tạo điều kiện cho sự hình thành gradient ứng suất dư. Theo Leppert và Peng [1], điều kiện tiện khô thép C45 tương tự sinh ra ứng suất dư kéo trên bề mặt gia công, làm giảm tuổi bền mỏi của chi tiết. Malotová và cộng sự [4] xác nhận rằng phân bố ứng suất dư phụ thuộc mạnh vào chế độ cắt và điều kiện làm mát.

(3) *Biến cứng bề mặt*: Ứng suất Von Mises 1.140MPa trong vùng cắt gây ra biến dạng dẻo lớn, dẫn đến biến cứng bề mặt và tăng độ cứng lớp bề mặt so với vật liệu nền. Nguyễn Bá Thuận [3] xác định chiều sâu lớp biến cứng phụ thuộc chủ yếu vào chiều sâu cắt và lượng chạy dao khi tiện thép C45, phù hợp với mức độ biến dạng dẻo được dự đoán trong mô phỏng này.

4.6. Khuyến nghị công nghệ

Cơ sở đề xuất: Phân tích cân bằng năng lượng cho thấy ALLPD/ALLFD $\approx 10:1$. Do đó, giải pháp công nghệ hiệu quả nhất cần tác động đồng thời vào cả hai cơ chế, ưu tiên kiểm soát biến dạng dẻo (chiếm 90%) và kết hợp giảm ma sát bề mặt (10%). Phương pháp bôi trơn lượng tối thiểu (Minimum Quantity Lubrication - MQL) đáp ứng tốt nhất yêu cầu này.

4.6.1. Nguyên lý và cơ chế tác động của MQL

MQL hoạt động bằng cách nguyên tử hóa lượng rất nhỏ dầu thực vật hoặc dầu khoáng sinh học (50 - 500ml/h) vào dòng khí nén (4 - 6 bar) và phun trực tiếp vào vùng cắt. Các hạt dầu siêu mịn thâm nhập vào vi mao dẫn tại giao diện dao - phôi và dao - phôi, tạo màng bôi trơn mỏng bền vững ngay cả dưới áp lực tiếp xúc cực cao. MQL tác động vào bài toán năng lượng theo hai hướng:

(i) Giảm ALLFD (~10% tổng nhiệt): Màng dầu MQL giảm hệ số ma sát Coulomb μ từ 0,3 (khô) xuống còn 0,1 - 0,15, làm giảm đáng kể thành phần ALLFD.

(ii) Giảm tiếp giảm ALLPD (~90% tổng nhiệt): Cải thiện điều kiện nhiệt biên tại giao diện dao - phôi, làm mỏng vùng biến dạng thứ cấp và giảm cục bộ ứng suất chảy thông qua mềm hóa nhiệt, từ đó giảm công biến dạng dẻo tổng thể.

4.6.2. Khuyến nghị thông số công nghệ

Kiểm soát tốc độ cắt: Tại $v_c = 225\text{m/phút}$, nhiệt độ đỉnh đã đạt 634°C . Khuyến nghị duy trì $v_c = 150 - 200\text{ m/phút}$ khi tiện khô hoàn toàn, hoặc ứng dụng MQL để mở rộng vùng an toàn nhiệt lên $v_c = 250 - 300\text{ m/phút}$.

Vật liệu dụng cụ cắt: Với đỉnh nhiệt 634°C , khuyến nghị sử dụng hợp kim cứng phủ TiAlN hoặc TiSiN (chịu nhiệt đến 900°C) thay vì TiN thông thường ($\sim 500^\circ\text{C}$). Lớp phủ Al_2O_3 bổ sung tạo hàng rào khuếch tán ngăn phản ứng hóa học giữa dao và phôi ở nhiệt độ cao.

Tối ưu hóa hình học dao: Tăng góc trước lên $\gamma = 12 - 15^\circ$ có thể giảm lực cắt chính và thu hẹp vùng biến dạng chính, từ đó giảm ALLPD. Bán kính bo mũi dao duy trì trong 0,2 - 0,4mm để cân bằng độ bền lưỡi cắt và nhiệt sinh ra do biến dạng nén vùng mũi dao.

Thông số MQL để xuất: Lưu lượng dầu 50 - 100ml/h, áp suất khí 4 - 5 bar, phun theo góc 30 - 45° so với mặt phẳng cắt, ưu tiên phun vào vùng giao diện mặt trước dao. Dầu sinh học (dầu thực vật ester hóa) được ưu tiên so với dầu khoáng do hệ số ma sát thấp hơn, điểm chớp cháy cao hơn và thân thiện với môi trường. Các thông số MQL cụ thể cần được xác nhận bằng thực nghiệm trong nghiên cứu tiếp theo.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình FEM 3D mô phỏng tiện khô thép C45 bằng Abaqus/Explicit, tích hợp phương trình trạng thái và tiêu chuẩn phá hủy Johnson-Cook. Các đóng góp khoa học chính gồm:

+ Nhiệt độ cực đại 634°C tập trung tại giao diện mặt trước dao - phôi, tiệm cận ngưỡng an toàn của hợp kim

cứng WC-Co. Nhiệt dư $370 - 380^\circ\text{C}$ lưu giữ trên bề mặt phôi xác nhận phôi là vật mang nhiệt chính (~75% nhiệt lượng). Kết quả nhất quán với các nghiên cứu FEM tiện thép C45 của Sandu và cộng sự [8] và Iynen và cộng sự [9].

+ ALLPD/ALLFD $\approx 10:1$, khẳng định biến dạng dẻo thể tích chiếm ~90% nguồn nhiệt. Đây là kết quả định lượng mới cung cấp cơ sở khoa học trực tiếp cho việc thiết kế chiến lược làm mát: các giải pháp chỉ tác động vào ma sát bề mặt không thể giải quyết > 90% lượng nhiệt phát sinh.

+ Ứng suất Von Mises cực đại 1.140MPa , kết hợp với nhiệt dư bề mặt $370 - 380^\circ\text{C}$ và tải nhiệt chu kỳ, là nguyên nhân chính gây biến cứng bề mặt, hình thành ứng suất dư kéo và giảm tuổi bền mỏi chi tiết trong điều kiện tiện khô.

+ Dựa trên nhu cầu cân bằng năng lượng, MQL được đề xuất là giải pháp tối ưu với thông số lưu lượng 50 - 100 ml/h và áp suất 4 - 5 bar, tác động vào cả hai cơ chế sinh nhiệt để đạt hiệu quả kiểm soát nhiệt toàn diện.

Mô hình hiện tại sử dụng hệ số ma sát Coulomb hằng số $\mu = 0,3$, trong khi thực tế μ biến thiên theo nhiệt độ và áp lực tiếp xúc. Kết quả lực cắt và nhiệt độ chưa được kiểm định với số liệu thực nghiệm - đây là hạn chế cần khắc phục trong các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Leppert T., Peng R. L., "Surface residual stresses in dry turning of 0.45% C steel," *Advances in x-ray analysis*, 52, 304-311, 2009.
- [2]. Oliveira Santos H., Ramos Barbosa M., Eduardo dos Santos C., Rosa Dumont M., "Machinability of Normalized and Stress-Relieved C45 Steel in Dry Internal Turning," *Tribology in Industry*, 47(4), 792-805, 2025. doi: 10.24874/ti.2015.09.25.11
- [3]. Thuan N. B., "Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt (S, t) đến lớp biến cứng bề mặt khi tiện trên máy tiện CNC với vật liệu thép C45 chưa qua nhiệt luyện," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, 11, 53-56, 2016.
- [4]. Malotová Š., et al., "Evaluation of Residual Stresses after Irregular Interrupted Machining," *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, 25(4), 2018. doi: 10.17559/tv-20160615125650
- [5]. Rajaguru J., Dwivedi M., Natarajan S., Krishnaswamy H., Arunachalam N., "Machining induced residual stress prediction during orthogonal cutting of super duplex stainless steel using CEL approach," *Journal of Manufacturing Processes*, 82, 474-487, 2022. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.071
- [6]. Shet C., Deng X., "Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process," *Journal of Materials Processing Technology*, 105(1), 95-109, 2000. doi: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00595-1

- [7]. Özel T., Zeren E., "Determination of work material flow stress and friction for FEA of machining using orthogonal cutting tests," *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 1019-1025, 2004. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.162>
- [8]. Țițu A. M., Pop A. B., Sandu I. G., "Study of temperature and stresses using finite element analysis in turning of C45 material," *Journal of Physics: Conference Series*, 1960(1), 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1960/1/012023
- [9]. İynen O., Ekşi A. K., Akyıldız H. K., Özdemir M., "Real 3D turning simulation of materials with cylindrical shapes using ABAQUS/Explicit," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(8), 2021. doi: 10.1007/s40430-021-03075-5
- [10]. Gopathy V., et al., "Experimental and numerical analysis on the cutting force, cutting temperature, and tool wear of alloy steel (4340) during turning process," *AIP Advances*, 14, 2024. doi: 10.1063/5.0227710
- [11]. Abed F. H., Saffarini M. H., Abdul-Latif A., Voyiadjis G. Z., "Flow Stress and Damage Behavior of C45 Steel Over a Range of Temperatures and Loading Rates," *Journal of Engineering Materials and Technology*, 139(2), 2017. doi: 10.1115/1.4035488
- [12]. Duan C. Z., Yu H. Y., Cai Y. J., Li Y. Y., "Finite Element Simulation and Experiment of Chip Formation during High Speed Cutting of Hardened Steel," *Applied Mechanics and Materials*, 29-32, 1838-1843, 2010. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.29-32.1838
- [13]. Qiu X., Cheng X., Dong P., Peng H., Xing Y., Zhou X., "Sensitivity Analysis of Johnson-Cook Material Constants and Friction Coefficient Influence on Finite Element Simulation of Turning Inconel 718," *Materials*, 12(19), 3121, 2019. doi: 10.3390/ma12193121
- [14]. Löschner P., Niesłony P., Kołodziej S., "Parameter Sensitivity Study of the Johnson–Cook Model in FEM Turning of Ti6Al4V Alloy," *Materials*, 18(14), 3351, 2025. doi: 10.3390/ma18143351
- [15]. Priest J., Ghadbeigi H., Ayvar-Soberanis S., Liljerehn A., Way M., "A modified Johnson-Cook constitutive model for improved thermal softening prediction of machining simulations in C45 steel," *Procedia CIRP*, 108, 106-111, 2022. doi: 10.1016/j.procir.2022.03.022

AUTHORS INFORMATION

Bui Tuan Anh, Nguyen Viet Tung

School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam