

NUMERICAL SIMULATION OF INCREMENTAL SHEET FORMING OF Al1050 ALUMINIUM SHEET

Hoang Trung Kien^{1*}, Nguyen Duc Toan²

¹TNU - University of Technology

²School of Mechanical Engineering - Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 20/3/2025 Revised: 09/7/2025 Published: 09/7/2025 KEYWORDS Numerical simulation Abaqus Incremental sheet forming Forming limit curve Al1050	Incremental sheet forming with its outstanding advantages is increasingly showing its important role in the field of sheet metal forming. The efficiency of the forming process is affected by many parameters, some of which are very difficult to measure and evaluate during the processing process. In addition, the general theory of this method still has conflicting opinions. Therefore, this study focuses on numerical simulation of incremental sheet forming process using Abaqus software. Accurate simulation of the machining process makes research on incremental sheet forming more convenient, faster, and less expensive. At the same time, simulation is especially useful in predicting defects and proposing optimal solutions before actual production, in designing and testing new products. In the numerical simulation of the incremental sheet forming process, the forming limit curve plays an important role and is an input data that has been not yet available and needs to be built. The research results build the forming limit curve for Al1050 sheet material and can simulate the incremental sheet forming process with an error of 1.54% - 4.60% compared to the experiment.

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG SỐ QUÁ TRÌNH GIA CÔNG BIẾN DẠNG ĐÉO CỤC BỘ TẤM HỢP KIM NHÔM Al1050

Hoàng Trung Kiên^{1*}, Nguyễn Đức Toàn²

¹Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

²Trường Cơ khí – Đại học Bách Khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 20/3/2025 Ngày hoàn thiện: 09/7/2025 Ngày đăng: 09/7/2025 TỪ KHÓA Mô phỏng số Phần mềm Abaqus Biến dạng dẻo cục bộ Đường cong giới hạn tạo hình Al1050	Gia công biến dạng dẻo cục bộ tấm kim loại với những ưu điểm nổi trội ngày càng thể hiện được vai trò quan trọng trong lĩnh vực gia công tấm kim loại. Hiệu quả của quá trình tạo hình chịu ảnh hưởng bởi nhiều thông số, trong đó có những thông số rất khó để đo lường, đánh giá trong quá trình gia công. Bên cạnh đó, lý thuyết khái quát về phương pháp này hiện vẫn còn nhiều ý kiến trái chiều. Vì vậy, nghiên cứu này tập trung mô phỏng số quá trình gia công biến dạng dẻo cục bộ tấm kim loại bằng phần mềm Abaqus. Việc mô phỏng chính xác quá trình gia công sẽ giúp quá trình nghiên cứu về phương pháp này được thuận lợi hơn, nhanh chóng hơn, ít tốn kém hơn. Đồng thời, mô phỏng đặc biệt hữu ích trong việc dự đoán các sai hỏng và đề ra phương án tối ưu trước khi sản xuất thực tế, trong thiết kế, thử nghiệm các sản phẩm mới. Trong mô phỏng số quá trình này thì đường cong giới hạn tạo hình đóng vai trò quan trọng và là dữ liệu đầu vào chưa có sẵn cần phải xây dựng. Kết quả nghiên cứu đã xây dựng được đường cong giới hạn tạo hình cho tấm Al1050 và có thể mô phỏng quá trình gia công với sai số từ 1,54% - 4,60% so với thực nghiệm.

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12356>

* Corresponding author. Email: htk@tnut.edu.vn

1. Giới thiệu

Những thiết bị không thể thiếu trong đời sống hàng ngày như ô tô, máy bay, tàu vũ trụ, tàu thủy, đồ dùng gia dụng, thiết bị y tế, v.v. đều có thân, vỏ được chế tạo từ tấm kim loại [1]. Chính vì vậy, hiện tại và trong tương lai, các phương pháp gia công truyền thống [2] không ngừng được cải tiến đi kèm với sự ra đời của những phương pháp mới ưu việt hơn nhằm giải quyết một khối lượng công việc khổng lồ với nhiều đòi hỏi và thách thức khác nhau về gia công tấm. Với lợi thế hệ thống công nghệ, đồ gá, dụng cụ gia công đơn giản, dễ vận hành, giá thành thấp, gia công biến dạng dẻo cục bộ tấm kim loại (Incremental sheet forming (ISF)) hiện là phương pháp được ưu tiên áp dụng [3]. Phương pháp này ngay từ khi ra đời tới nay đã không ngừng đổi mới và đã giải quyết được phần lớn những nhu cầu đặt ra về gia công tấm [4]. ISF có thể gia công hiệu quả những chi tiết có hình dạng phức tạp, được làm từ nhiều loại vật liệu khác nhau, đặc biệt là vật liệu mới, vật liệu khó gia công hoặc giúp phát triển sản phẩm mới nhanh chóng trên một hệ thống công nghệ linh hoạt, chi phí thấp mà vẫn đảm bảo tốt những yêu cầu khắt khe về kỹ thuật [5].

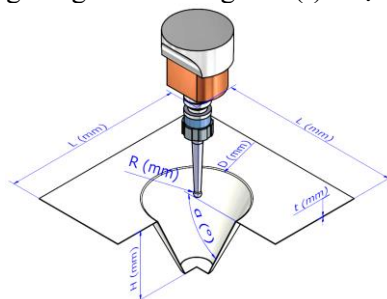
Tuy nhiên, trong quá trình tạo hình sản phẩm, những sai hỏng về tính đồng đều của độ dày thành chi tiết, độ chính xác hình học và các hạn chế của quy trình cản trở ứng dụng công nghiệp quy mô lớn của phương pháp ISF. Để dự đoán những sai hỏng trước khi gia công ISF, đã có nhiều nghiên cứu về mô phỏng số [6] - [12] của quá trình tạo hình này. Bouhamed và cộng sự [13] đã tập trung nghiên cứu mô phỏng số của quá trình ISF. Để đảm bảo độ chính xác của mô hình mô phỏng và dự đoán sự thay đổi về độ dày của tấm, nghiên cứu đã đề xuất một mô hình để mô tả tính dị hướng của vật liệu và cho thấy sự phù hợp hơn khi sử dụng hai mô hình là Hill-R và Hill-S. Han và cộng sự [14] đã xây dựng đường cong giới hạn tạo hình (Forming limit curve (FLC)) cho vật liệu tấm nhôm và thép được so sánh với dữ liệu thực nghiệm. Nghiên cứu đã dựa trên điều kiện ứng suất phẳng và tiêu chí năng suất dị hướng phi bậc hai của Barlat. Rusu [15], Xiao [16] cũng đã nghiên cứu mô phỏng quá trình ISF, trong đó Xiao [16] đã đánh giá ảnh hưởng của rung động tần số thấp đến toàn bộ quá trình tạo hình. Tác giả Shang [17] cũng đã mô phỏng quá trình ISF và đánh giá về độ dày thành chi tiết và góc tạo hình tới hạn.

Để có thể mô phỏng số quá trình ISF trên phần mềm Abaqus, cần phải xây dựng được FLC để làm dữ liệu mô phỏng. Nghiên cứu này trình bày một phương pháp tính toán mới, đơn giản và cho kết quả tin cậy cao trong việc xây dựng FLC của vật liệu Al1050. Tiếp đó, các thí nghiệm thực nghiệm được tiến hành để kiểm nghiệm mô hình mô phỏng trước khi áp dụng vào nhiều nghiên cứu quan trọng tiếp theo.

2. Thiết kế thí nghiệm

2.1. Hình dạng chi tiết nghiên cứu

Biến dạng tạo hình trong nghiên cứu là hình nón cụt, có đường kính đáy lớn là D (mm), chiều cao tạo hình là H (mm) và góc nghiêng thành tường là α ($^{\circ}$) được thể hiện như trên Hình 1.



Hình 1. Hình dạng của chi tiết nghiên cứu

2.2. Vật liệu nghiên cứu

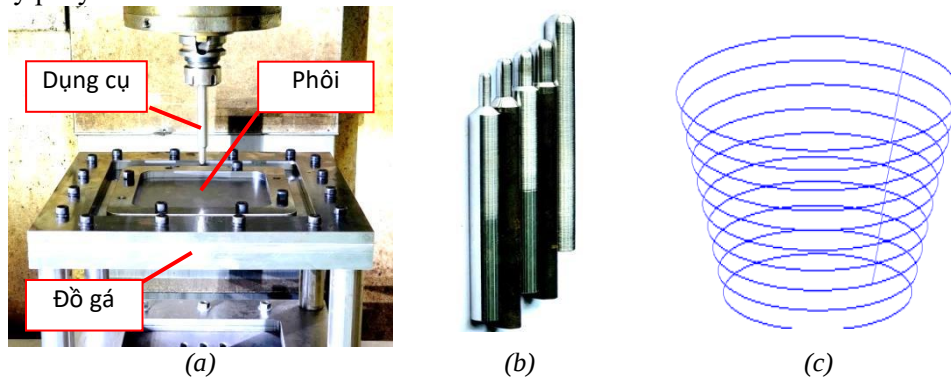
Phần thực nghiệm của nghiên cứu sử dụng vật liệu hợp kim nhôm Al1050 có thành phần hóa học như trong Bảng 1. Tấm vật liệu hình vuông có cạnh $L = 230$ mm và dày 0,5 mm.

Bảng 1. Thành phần hoá học hợp kim nhôm Al1050

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	V
Wt	99,164	0,071	0,231	0,013	0,005	< 0,002	0,014	0,027	0,021

2.3. Đồ gá và thiết bị thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, quá trình thực nghiệm gia công các mẫu hình nón cụt được thực hiện trên máy phay CNC Mazak VCN530C-SG.



Hình 2. (a) Sơ đồ gia công, (b) Dụng cụ tạo hình, (c) Đường dẫn dụng cụ

Sơ đồ gia công của quá trình gia công biến dạng dẻo cụ bộ tấm kim loại được thể hiện trong Hình 2a. Phôi được kẹp giữa tấm đỡ cố định và tấm chặn, tất cả được kẹp chặt bằng bu lông. Dụng cụ tạo hình có phần đầu dạng chỏm cầu bán kính 4 mm, nhám bề mặt là $Ra = 0,25$ μ m như trong Hình 2b. Đường dẫn dụng cụ được tạo bằng phần mềm Matercam như trên Hình 2c. Bảng 2 thể hiện các thông số được lựa chọn để tiến hành các thí nghiệm.

Bảng 2. Thông số thí nghiệm

Thông số dụng cụ		Thông số thí nghiệm				Tươi nguội
Vật liệu	Bán kính (mm)	S (v/p)	F (mm/p)	t (mm)	α ($^\circ$)	
SKD11	4	3000	2000	0,5	60	VG68

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Xây dựng đường cong giới hạn tạo hình của vật liệu Al1050

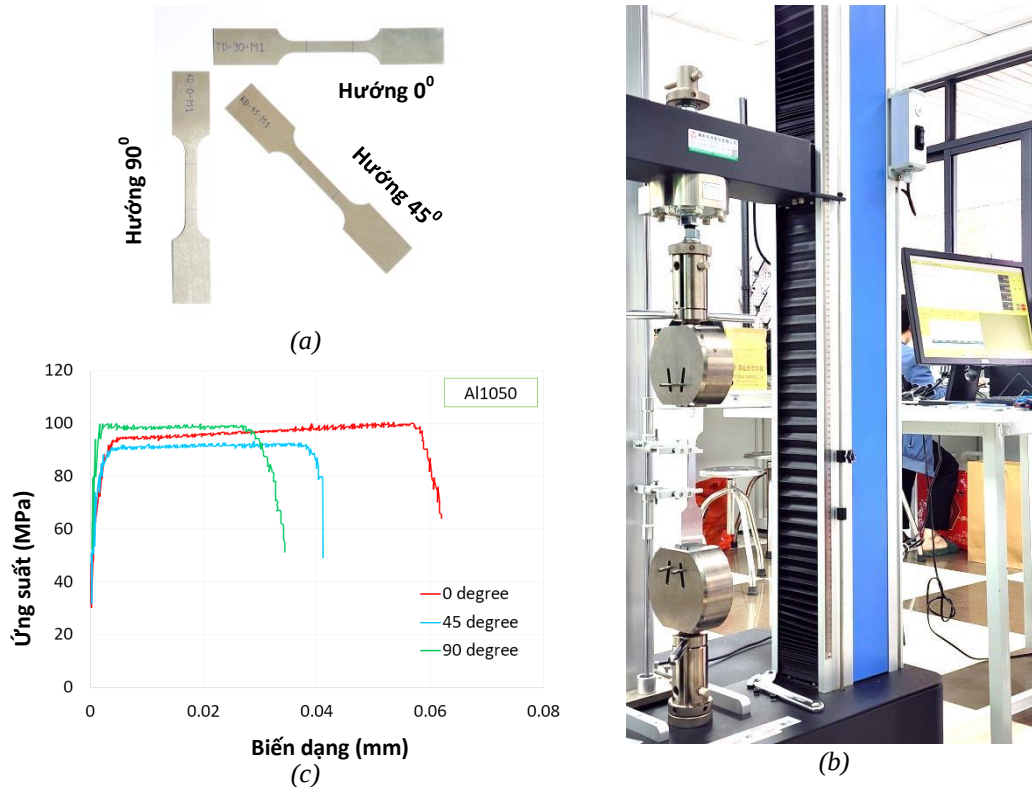
3.1.1. Xác định cơ tính của vật liệu Al1050

Tính dị hướng của vật liệu ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng của sản phẩm tạo hình. Các mẫu được cắt bằng tia nước theo các phương: phương cán, phương vuông góc với phương cán và 45° so với phương cán (Hình 3a). Các mẫu được kéo trên máy YS-L45-J11 theo tiêu chuẩn ISO 6892-1 như trong Hình 3b. Kết quả đường cong ứng suất biến dạng theo ba phương được biểu diễn như trên đồ thị Hình 3c. Tính chất vật liệu được mô tả như Bảng 3.

Bảng 3. Cơ tính vật liệu Al1050

Vật liệu	Al1050		
Phương cán	0°	45°	90°
Ứng suất chảy (MPa)	81,6	79,7	89,8
Hệ số dị hướng (r)	0,62	0,38	0,85
Mật độ vật liệu (ρ kg/mm ³)	2,7e-06		
Mô đun đàn hồi (E , kN/mm ²)	69		
Hệ số Poisson	0,33		

3.1.2. Xây dựng đường cong giới hạn tạo hình bằng phương pháp hóa đồ



Hình 3. Thí nghiệm kéo đơn trục Al1050:

(a) Mẫu thử kéo được cắt theo 3 phương, (b) Kéo mẫu, (c) Đồ thị quan hệ giữa ứng suất và biến dạng

Dựa trên cơ sở tiêu chuẩn trở lực tối đa được sửa đổi (MMFC) liên quan đến việc quan sát quá trình chuyển đổi đường biến dạng sau khi vết nứt xuất hiện. Biểu thức cho MMFC được đưa ra là:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} d\varepsilon_1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \varepsilon_1} d\varepsilon_1 \geq \sigma_1 d\varepsilon_1 \quad (1)$$

Trong đó, $\beta = \Delta \varepsilon_2 / \Delta \varepsilon_1$ biểu thị tỷ lệ biến dạng theo 2 phương chính. Giả thiết rằng $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$ biểu thị tỷ lệ ứng suất theo hai phương chính; và hai hàm số $f(\alpha) = \bar{\sigma} / \sigma_1$ và $g(\alpha) = \Delta \bar{\varepsilon} / \Delta \varepsilon_1$ mô tả mối quan hệ giữa các thành phần ứng suất (σ_1), biến dạng chính (ε_1) thứ nhất so với ứng suất ($\bar{\sigma}$) và biến dạng ($\bar{\varepsilon}$) tương đương. Với mỗi hàm cứng hóa được lựa chọn cho quan hệ giữa ứng suất - biến dạng, các số hạng $\partial \sigma_1 / \partial \varepsilon_1$ và $\partial \sigma_1 / \partial \beta$ được xác định:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \bar{\sigma}} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\varepsilon}} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial \varepsilon_1} = g(\alpha) H' / f(\alpha) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \beta} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial \beta} = - \frac{f'(\alpha)}{[f(\alpha)]^2} \bar{\sigma} \frac{\partial \alpha}{\partial \beta} = - \frac{f'(\alpha)}{[f(\alpha)]^2} H / \left(\frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \right) \quad (3)$$

Trong các phương trình (2-3), $H = H(\bar{\varepsilon})$ biểu thị hàm cứng hóa và H' biểu thị độ dốc của đường cong cứng hóa. Bằng cách tuân theo quy luật cơ học môi trường liên tục, ta có:

$$\beta = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} = \frac{\partial \bar{\sigma} / \partial \sigma_2}{\partial \bar{\sigma} / \partial \sigma_1} \quad (4)$$

Do đó, $\beta'(\alpha)$ sẽ được xác định rõ ràng. Việc đánh giá của $\partial \beta / \partial \varepsilon_1$ được thực hiện bằng cách sử dụng lập trình quy trình lặp. Tuy vậy, để tăng tính hiệu quả và đơn giản hóa quá trình tính toán $\beta \approx \varepsilon_2 / \varepsilon_1$ được lựa chọn gần đúng. Do đó, đạo hàm thu được là:

$$\frac{\partial \beta}{\partial \varepsilon_1} \approx - \frac{\beta}{\varepsilon_1} \quad (5)$$

Các phương trình (2) – (5) được thay vào phương trình (1), dẫn đến một công thức rõ ràng của tiêu chuẩn trở lực tối đa được sửa đổi là:

$$\frac{H'}{H} \geq \frac{1}{g(\alpha)} \left[1 - \frac{f'(\alpha)}{f(\alpha)} \frac{\beta}{\beta'(\alpha)} \frac{1}{\varepsilon_1} \right] \quad (6)$$

Để xây dựng FLC cho Al1050 một cách đơn giản, một phương pháp mới - phương pháp họa đồ đã được sử dụng trong nghiên cứu này. Ở bất kỳ giai đoạn biến dạng nào thì phương trình (6) có thể được viết lại dưới dạng biểu thức (7.a):

$$\frac{H'}{H} \geq A - \frac{B}{\varepsilon} \quad (7.a)$$

$$\text{Khi đó } A = 1/g(\alpha) \quad (7.b)$$

$$B = (f'/f) \cdot (\beta/\beta') \quad (7.c)$$

$A(\alpha)$ và $B(\alpha)$ có thể xác định được từ các hệ số của hàm ứng suất Hill'48R. Các giá trị của phương trình (7.b)-(7.c) được xác định dựa theo các phương trình (8.a)-(8.e) và phương trình (9.a)-(9.b). Tính toán cho các chế độ biến dạng đặc biệt là biến dạng kéo đơn trục (U.T) ($\beta = -1/2$) và biến dạng kéo đều đồng thời theo hai phương (B.T) ($\beta = 1$) có thể được lấy như liệt kê trong Bảng 4.

Bảng 4. Các hệ số được xác định ở hai chế độ tạo hình, dựa trên hàm ứng suất Hill'48R

Coefficient	(U.T)	(B.T)
α	0	1
Hill'48R β	-0,5	1
$A(\alpha)$	1	0,597
$B(\alpha)$	0,213	0,171

Bảng 5. Biến dạng chính – phụ với các mô hình vật liệu

Coefficient		(U.T)	(B.T)
Kim-Tuan $\bar{\varepsilon}$		0,415	0,625
ε_1		0,410	0,354
ε_2		-0,205	0,354

Dựa trên các giá trị được tính toán và các phương trình đã nói ở trên, phương trình (9.a) có thể được vẽ như thể hiện trong Hình 4.a bằng cách áp dụng các mô hình Kim-Tuan [18].

$$f(\alpha) = \sqrt{(G+H) - 2H\alpha + (F+H)\alpha^2} \quad (8.a)$$

$$f'(\alpha) = \frac{[-H+(F+H)\alpha]}{\sqrt{(G+H) - 2H\alpha + (F+H)\alpha^2}} \quad (8.b)$$

$$\beta(\alpha) = \frac{(F+H)\alpha - H}{-H\alpha + (G+H)} \quad (8.c)$$

$$\beta'(\alpha) = \frac{(F+H)(G+H) - H^2}{[-H\alpha + (G+H)]^2} \quad (8.d)$$

$$g(\alpha) = \frac{\sqrt{(G+H) - 2H\alpha + (F+H)\alpha^2}}{-H\alpha + (G+H)} \quad (8.e)$$

$$\text{Khi đó: } A(\alpha) = \frac{-H\alpha + (G+H)}{\sqrt{(G+H) - 2H\alpha + (F+H)\alpha^2}} \quad (9.a)$$

$$B(\alpha) = \frac{-H + (F+H)\alpha}{(G+H) - 2H\alpha + (F+H)\alpha^2} \times \frac{[(F+H)\alpha - H] \times [-H\alpha + (G+H)]}{(F+H)(G+H) - H^2} \quad (9.b)$$

$$\varepsilon_1 = \bar{\varepsilon} / \sqrt{\frac{R_m+1}{2R_m+1}} \sqrt{1 + \frac{2R_m}{R_m+1} \beta + \beta^2} \quad (10.a)$$

$$\varepsilon_2 = \beta \varepsilon_1 \quad (10.b)$$

$$R_m = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90}) \quad (10.c)$$

Phương pháp họa đồ như Hình 4a cho thấy giao điểm biến dạng phá hủy tương đương của các đường biến dạng (U.T), (B.T) với đường cong được xây dựng như dựa trên mô hình của Swift có giá trị tương ứng là $\bar{\varepsilon} = 0,65$ và $\bar{\varepsilon} = 0,95$. Sau đó, các biến dạng chính và phụ được xác định thông qua các phương trình (10.a) - (10.c). FLC thu được bằng cách vẽ từ hai điểm biến dạng đặc biệt như trong Bảng 5 và đồ thị Hình 4b.

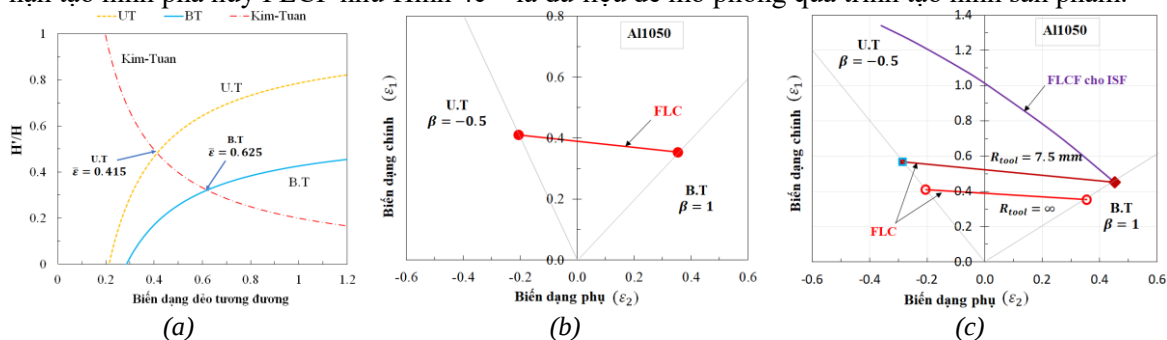
Trong đó, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ tương ứng với các biến dạng chính và phụ, $\bar{\varepsilon}$ là biến dạng tương đương, β là tỷ lệ biến dạng, R_m là giá trị Lankford.

Với FLC được xây dựng như trên Hình 4b, độ lệch giữa chiều cao tạo hình mô phỏng và thực nghiệm còn tương đối lớn, do đó cần tiếp tục cải thiện. Thực hiện phép tính tích phân, chúng ta có thể rút ra biến dạng tương đương tại vết nứt dẻo dưới dạng giá trị không đổi như công thức 12.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}} \bar{\sigma} \cdot d\bar{\varepsilon} = C \quad (11)$$

$$\bar{\varepsilon}_f = C_1 \quad (12)$$

Trong đó, $\bar{\varepsilon}_f$ là biến dạng tương đương tại đó xảy ra đứt gãy, $\bar{\sigma}$ và $\bar{\varepsilon}$ lần lượt ứng suất tương đương, là biến dạng tương đương, C, C_1 là hằng số vật liệu. Kết quả thu được đường cong giới hạn tạo hình phá hủy FLCF như Hình 4c – là dữ liệu để mô phỏng quá trình tạo hình sản phẩm.

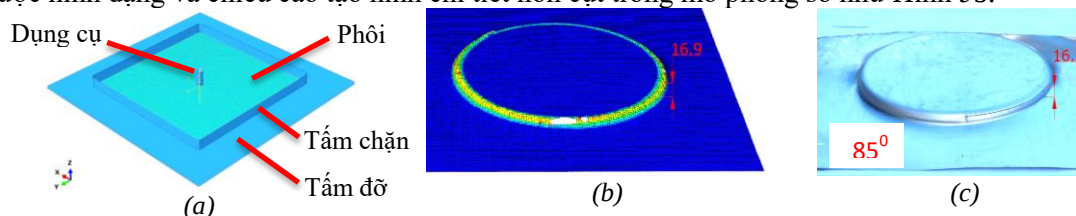


Hình 4. (a) Phương pháp họa đồ dự đoán đường cong giới hạn tạo hình của Al1050, (b) FLC được tính toán dựa trên phương pháp họa đồ cho vật liệu Al1050, (c) FLCF được đề xuất của vật liệu Al1050

3.2. Mô phỏng số quá trình gia công và thực nghiệm kiểm chứng

3.2.1. Mô phỏng quá trình gia công tấm hợp kim nhôm Al1050

Phần mềm ABAQUS được sử dụng để mô phỏng quá trình tạo hình chi tiết hình nón cụt như Hình 1 với các thông số gia công ở Bảng 2. Hình 5a thể hiện mô hình phần tử hữu hạn của quá trình ISF, bao gồm tấm phôi Al1050, dụng cụ, tấm đỡ phôi và tấm chặn. Tấm phôi là phần tử vô với số lượng điểm giảm tích hợp (S4R). Dụng cụ, tấm đỡ và tấm chặn phôi được mô hình hóa dưới dạng cứng tuyệt đối. Điều kiện biên cố định đã được gán cho tấm đỡ cố định và tấm chặn. Phôi được kẹp chặt và được tác dụng bởi lực thẳng đứng hướng xuống của dụng cụ. Đường dẫn dụng cụ như Hình 2.c. Các thông số của vật liệu như trong Bảng 3, các hệ số dị hướng của vật liệu và đặc biệt là FLC của vật liệu được khai báo trong quá trình mô phỏng số. Từ đó, xác định được hình dạng và chiều cao tạo hình chi tiết nón cụt trong mô phỏng số như Hình 5b.



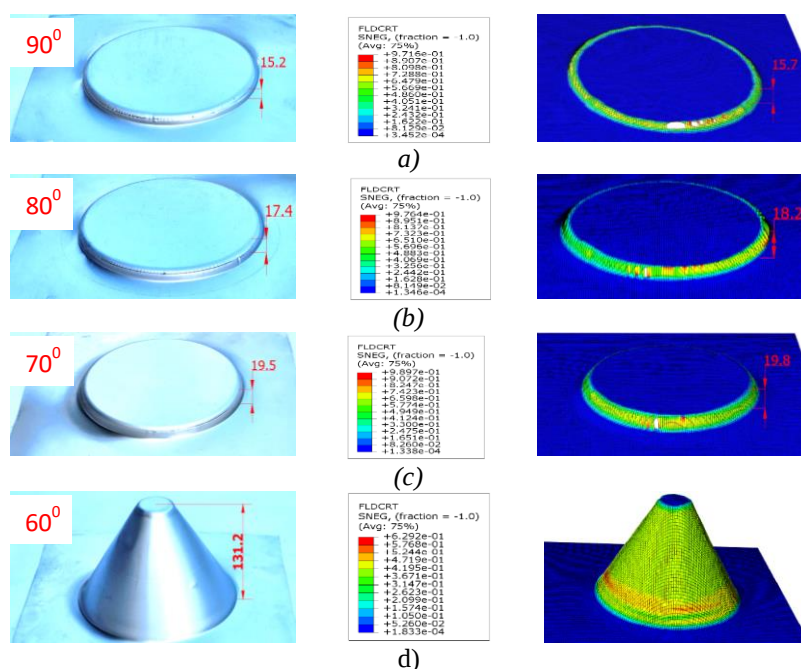
Hình 5. (a) Mô hình ISF trên phần mềm Abaqus, (b) Sản phẩm mô phỏng, (c) Sản phẩm thực nghiệm

3.2.2. So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm

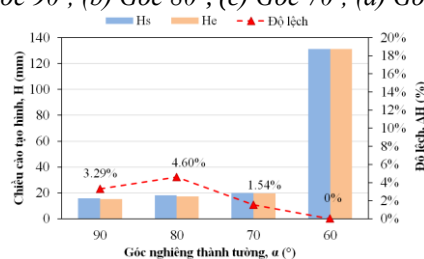
Để xác minh độ tin cậy của mô hình mô phỏng, quá trình mô phỏng và thực nghiệm đã được tiến hành đối với các mẫu có góc nghiêng thành tường khác nhau như trong Bảng 6. Kết quả được trình bày trong Hình 6. Bảng 6 và đồ thị Hình 7 mô tả chiều cao tạo hình của các mẫu và độ lệch khi mô phỏng và thực nghiệm. Kết quả cho thấy mô hình mô phỏng được đề xuất cho sự tương đồng về chiều cao tạo hình của các mẫu hình nón cụt khi mô phỏng và thực nghiệm tương ứng.

Bảng 6. Độ lệch giữa chiều cao tạo hình khi mô phỏng và thực nghiệm với các góc tạo hình khác nhau

Góc nghiêng thành tường (°)	60	70	80	90
Chiều cao mô phỏng, H_s (mm)	131,2	19,8	18,2	15,7
Chiều cao thực nghiệm, H_e (mm)		19,5	17,4	15,2
Độ lệch, ΔH		1,54%	4,60%	3,29%
FLDCRT value	0,6292	1,0	1,0	1,0



Hình 6. Hình ảnh chiều cao tạo hình chi tiết nón cắt khi thực nghiệm và mô phỏng:
(a) Góc 90° , (b) Góc 80° , (c) Góc 70° , (d) Góc 60°



Hình 7. Đồ thị độ lệch về chiều cao tạo hình chi tiết giữa mô phỏng và thực nghiệm

4. Kết luận

Nghiên cứu đã tiến hành mô phỏng quá trình gia công biến dạng dẻo cục bộ tấm hợp kim nhôm Al1050, một số kết luận quan trọng được rút ra như sau: 1) Một phương pháp xây dựng đường cong giới hạn tạo hình đơn giản (Phương pháp họa đồ) trên cơ sở phương pháp trở lực tối đa được sửa đổi đã được áp dụng thành công giúp quá trình tính toán đơn giản, nhanh chóng với kết quả có độ tin cậy cao. 2) Đường cong giới hạn tạo hình của Al1050 đã được xây dựng và dùng làm dữ liệu đầu vào cho việc mô phỏng quá trình gia công biến dạng dẻo cục bộ tấm trên phần mềm Abaqus. 3) Đường cong giới hạn tạo hình được xây dựng cho độ chính xác mô phỏng cao, tin cậy, sai số từ 1,54% - 4,60% so với thực nghiệm. Tuy nhiên mô hình được xây dựng mới chỉ áp dụng được ở nhiệt độ phòng và cần phát triển cho quá trình mô phỏng ở các nhiệt độ cao khác nhau. Mô hình mô phỏng số này có thể sử dụng trong những nghiên cứu tiếp theo để đánh giá: độ chính xác hình dáng hình học, nhám bề mặt, sự phân bố bề dày thành chi tiết, hiện tượng đàn hồi ngược... khi gia công biến dạng dẻo cục bộ tấm kim loại.

Lời cảm ơn

Tác giả xin gửi lời cảm ơn tới Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - Đại học Thái Nguyên đã hỗ trợ kinh phí để thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] P. Kah, *Advancements in Intelligent Gas Metal Arc Welding Systems: Fundamentals and Applications*. Elsevier, 2021, doi: 10.1016/C2019-0-04191-X.
- [2] N. F. Lone, N. Ali, A. M. Qazi, D. Bajaj, and A. N. Siddiquee, “New developments in bend forming of welded sheet metals,” in *Comprehensive Materials Processing*, vol. 12, pp. 27-40, 2024, doi: 10.1016/b978-0-323-96020-5.00034-0.
- [3] K. Jackson and J. Allwood, “The mechanics of incremental sheet forming,” *J. Mater Process Technol*, vol. 209, no. 3, pp. 1158–1174, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.025.
- [4] T. Trzepieciński, S. M. Najm, T. Pepelnjak, K. Bensaid, and M. Szpunar, “Incremental Sheet Forming of Metal-Based Composites Used in Aviation and Automotive Applications,” *Journal of Composites Science*, vol. 6, no. 10, 2022, doi: 10.3390/jcs6100295.
- [5] S. P. Kumar, S. Elangovan, R. Mohanraj, and S. Boopathi, “Real-time applications and novel manufacturing strategies of incremental forming: An industrial perspective,” in *Materials Today: Proceedings*, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.109.
- [6] M. T. Mezher, S. M. Khazaal, N. S. M. Namer, and R. A. Shakir, “A comparative analysis study of hole flanging by incremental sheet forming process of AA1060 and DC01 sheet metals,” *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 16, no. 6, pp. 4383 – 4403, 2021.
- [7] J. Naranjo, V. Miguel, A. Martínez, J. Coello, and M. C. Manjabacas, “Analysis of material behavior models for the Ti6Al4V alloy to simulate the Single Point Incremental Forming process,” in *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 307-314, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.079.
- [8] M. T. Mezher and B. Kovács, “An Investigation of the Impact of Forming Process Parameters in Single Point Incremental Forming Using Experimental and Numerical Verification,” *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 66, no. 3, 2022, doi: 10.3311/PPme.18781.
- [9] A. Al-Obaidi, V. Kräusel, and M. Kroll, “FE Simulation of Hot Single Point Incremental Forming Assisted by Induction Heating,” in *XIX International UIE Congress on Evolution and New Trends in Electrothermal Processes*, 2021, pp. 47 - 48.
- [10] M.-O. Popp, G.-P. Rusu, I.-O. Popp, and C.-E. Girjob, “Numerical Study of a Variable Wall Angle Made of DC01 Steel by Incremental Forming Process,” *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series*, vol. 74, no. 1, 2022, doi: 10.2478/aucts-2022-0004.
- [11] P. Gupta and J. Jeswiet, “Parameters for the FEA simulations of single point incremental forming,” *Prod Manuf Res*, vol. 7, no. 1, 2019, doi: 10.1080/21693277.2019.1608330.
- [12] B. Saidi, L. Giraud Moreau, A. Cherouat, and R. Nasri, “Experimental and numerical study on warm single-point incremental sheet forming (WSPIF) of titanium alloy Ti–6Al–4V, using cartridge heaters,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, 2020, doi: 10.1007/s40430-020-02632-8.
- [13] A. Bouhamed, H. Jrad, L. B. Said, M. Wali, and F. Dammak, “A non-associated anisotropic plasticity model with mixed isotropic–kinematic hardening for finite element simulation of incremental sheet metal forming process,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 100, no. 1–4, 2019, doi: 10.1007/s00170-018-2782-3.
- [14] H. N. Han and K. H. Kim, “A ductile fracture criterion in sheet metal forming process,” *J. Mater Process Technol.*, vol. 142, no. 1, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00587-9.
- [15] G. P. Rusu, R. E. Breaz, M. O. Popp, V. Oleksik, and S. G. Racz, “Experimental Research on Wolfram Inert Gas AA1050 Aluminum Alloy Tailor Welded Blanks Processed by Single Point Incremental Forming Process,” *Materials*, vol. 16, no. 19, 2023, doi: 10.3390/ma16196408.
- [16] X. Xiao, S. H. Oh, S. H. Kim, and Y. S. Kim, “Effects of Low-Frequency Vibrations on Single Point Incremental Sheet Forming,” *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 2, 2022, doi: 10.3390/met12020346.
- [17] M. Shang, Y. Li, M. Yang, Y. Chen, L. Bai, and P. Li, “Wall Thickness Uniformity in ISF of Hydraulic Support: System Design, Finite Element Analysis and Experimental Verification,” *Machines*, vol. 11, no. 3, 2023, doi: 10.3390/machines11030353.
- [18] Q. T. Pham and Y. S. Kim, “Evaluation of press formability of pure titanium sheets,” in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd., 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.716.87.