

DỰ ĐOÁN ĐƯỜNG CONG GIỚI HẠN TẠO HÌNH CHO VẬT LIỆU SPCC BẰNG PHƯƠNG PHÁP HOẠ ĐỒ VÀ THỰC NGHIỆM KIỂM CHỨNG

Luyện Thế Thanh¹, Bành Tiến Long^{1,2}, Nguyễn Đức Toàn^{1,2,*}

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên,

²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Trong lĩnh vực gia công biến dạng tạo hình kim loại tấm, đặc biệt trong các nghiên cứu về đường cong giới hạn tạo hình (FLC) của vật liệu, cần phải nói tới tiêu chuẩn trở lực tối đa được sửa đổi (MMFC) do Hora và đồng nghiệp đề xuất. Tiêu chuẩn này đã được sử dụng rộng rãi để tính toán dựa trên lý thuyết giới hạn tạo hình (FLC) theo quy luật cứng hóa đường cong chảy dẻo (ứng suất-biến dạng) của kim loại tấm. Dựa trên tiêu chuẩn này, một phương pháp họa đồ đã được trình bày trong nghiên cứu Kim – Tuan nhằm đơn giản hóa việc đánh giá đường cong giới hạn hình (FLC) của kim loại tấm. Nghiên cứu này trình bày một ứng dụng của phương pháp họa đồ để ước tính đường cong giới hạn hình thành (FLC) của vật liệu thép SPCC thường được sử dụng trong ngành công nghiệp ô tô. Để chứng minh tính khả thi của phương pháp họa đồ, giới hạn tạo hình (FLC) được ước tính và dự báo từ phương pháp này đã được đưa vào mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để dự đoán chiều cao rách của quá trình dập chi tiết cốc lọc nhiên liệu và so sánh với dữ liệu thực nghiệm tương ứng. Kết quả so sánh đã chứng minh được sự đồng thuận cao giữa mô phỏng và thực nghiệm.

Từ khóa: Đường cong giới hạn tạo hình (FLC); Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM); Tiêu chuẩn lực tối đa được sửa đổi (MMFC); Phương pháp họa đồ; Quá trình dập sâu; Cốc lọc nhiên liệu; Thép tấm SPCC

Ngày nhận bài: 08/5/2019; Ngày hoàn thiện: 13/5/2019; Ngày duyệt đăng: 16/5/2019

PREDICTION FORMING LIMIT CURVE FOR SPCC MATERIALS BY GRAPHICS METHOD AND EXPERIMENTAL VERIFICATION

Luyen The Thanh¹, Bành Tiến Long^{1,2}, Nguyen Duc Toan^{1,2,*}

¹Hungyen University of Technology and Education,

²Hanoi University of Technology

ABSTRACT

In the field of sheet metal forming process, particularly in the study of the forming limit curve (FLC) of materials, it is necessary to mention the modified maximum force criterion (MMFC) by Hora and colleagues. The proposal criterion has been widely used to estimate on the theory of forming limit curve of sheet metal. Based on this criterion, a graphical method was presented by Kim - Tuan to simplify the evaluation of the forming limit curve of sheet metal. This study presents an application of the graphical method to estimate the forming limit curve of SPCC steel materials which were used in the automotive industry. In order to confirm the accuracy of the graphic method, different hardening models of the stress-strain curve are used to estimate FLC for SPCC sheet material. The calculated FLC was then used as the input file for the finite element method (FEM) to predict the fracture height of the fuel filter cup and then compare with the corresponding experiment. The comparison results have demonstrated a good agreement between simulation and experiment.

Keywords: Forming limit curve (FLC); Finite element method (FEM); Modified maximum force criterion; Graphical method; Deep drawing process; Fuel filter cup; SPCC steel sheet.

Received: 08/5/2019; Revised: 13/5/2019; Approved: 16/5/2019

* Corresponding author. Email: toan.nguyenduc@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Ngày nay, các phương pháp gia công kim loại dựa trên sự biến dạng của vật liệu đã chiếm một vị trí quan trọng trong sản xuất cơ khí và luyện kim. Các ứng dụng của việc mô phỏng số trong lĩnh vực tạo hình kim loại sẽ giúp các kỹ sư giải quyết các vấn đề khác nhau trong quá trình sản xuất các sản phẩm công nghiệp có chất lượng cao, tăng năng suất và giảm giá thành sản phẩm. Các kết quả mô phỏng chính xác là rất cần thiết cho việc thiết kế khuôn và cải thiện chất lượng của sản phẩm cuối cùng. Có rất nhiều các yếu tố có thể tác động đến kết quả mô phỏng khả năng rách, nứt của sản phẩm, nhưng để dự báo nhanh hiện tượng rách, nứt của chi tiết thì đường cong giới hạn tạo hình FLC của vật liệu là đầu vào quan trọng nhất. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để đánh giá đường cong giới hạn tạo hình (FLC) của các vật liệu được thử nghiệm bằng thực nghiệm và lý thuyết. Khái niệm về giới hạn tạo hình (FLC) đã được áp dụng rộng rãi trong các gói phần mềm mô phỏng thương mại khác nhau cho việc nghiên cứu và phát triển sản phẩm (R&D).

Theo cách tiếp cận thực nghiệm, thử nghiệm Nakazima [1] và thử nghiệm Marciniak Kuczynski [2] là những phương pháp phổ biến đã được sử dụng rộng rãi để làm rõ các mức độ của đường cong giới hạn tạo hình cho kim loại tấm. Tuy nhiên, phương pháp thực nghiệm này tốn thời gian và chi phí tính toán cao. Do đó, những nỗ lực nghiên cứu lý thuyết cơ bản đã được thực hiện để làm rõ việc dự báo FLC. Có thể liệt kê các công trình lý thuyết như: Swift [3] tiên phong nghiên cứu về sự lan toả và tiến triển lỗ trống và vết nứt trong vật liệu. Kế thừa nghiên cứu đó, Hill [4] đề xuất mô hình thông qua việc thay đổi chiều dày tấm kim loại tại vị trí vết nứt xuất hiện. Những năm gần đây, Hora cùng cộng sự [5] phát triển nghiên cứu của Swift và đưa ra tiêu chuẩn lực tối đa đã sửa đổi (MMFC) bằng cách cân nhắc trạng thái biến dạng tức thời trên vật mẫu cho đến khi đạt được lực tạo biến dạng tối đa.

Kim-Tuan [6-8] đã dùng phương pháp họa đồ để dự đoán đường cong giới hạn tạo hình của một số vật liệu tấm như AL5052-O, Al6016-T4, titan nguyên chất, inox 304. Trong phương pháp này, các vị trí biến dạng đặc biệt quan trọng được xác định bằng họa đồ dựa trên sự tính toán từ các phương trình biến dạng liên tục của hàm cứng hóa (ứng suất-biến dạng). Tuyến tính kết nối những vị trí biến dạng đặc biệt này sẽ cho ra biểu đồ FLC tối giản. Cách tiếp cận theo đề xuất này đã cung cấp một kết quả phù hợp so với nghiên cứu của Hora ở ba vị trí biến dạng quan trọng: biến dạng kéo đơn trục, biến dạng phẳng và biến dạng kéo đều đồng thời theo hai phương. Cách tiếp cận này đã được áp dụng thành công để dự báo các đường cong giới hạn tạo hình cho một số kim loại tấm cho độ chính xác cao [8]. Để xác minh tính chính xác của dự đoán FLC so với các thí nghiệm tương ứng, các nghiên cứu trước đây của nhóm tác giả Nguyen Duc-Toan [9 -11] đưa các dữ liệu đầu vào từ biểu đồ giới hạn tạo hình (FLC) vào phần mềm FEM để dự đoán, so sánh quá trình rách giữa mô phỏng và thực nghiệm.

Các nghiên cứu lý thuyết trước đây cho thấy rằng việc tính toán đường cong FLC, dựa trên bất kỳ mô hình lý thuyết nào sẽ đòi hỏi lời giải toán của một hệ thống các phương trình phức tạp liên quan và việc giải một hệ thống lớn các phương trình này là không hề dễ dàng cho dù đã có sự hỗ trợ của các phần mềm toán học. Do đó, nghiên cứu này nhằm mục đích đơn giản hóa việc xác định lý thuyết của giới hạn tạo hình (FLC) dựa trên tiêu chuẩn trở lực tối đa được sửa đổi (MMFC) cho kim loại tấm. Từ đó ứng dụng vào dự báo khả năng phá hủy một sản phẩm cụ thể, so sánh với thực nghiệm tương ứng để đánh giá mức độ chính xác hóa của việc dự báo phá hủy dẻo.

2. Phương pháp tiêu chuẩn trở lực tối đa được sửa đổi và phương pháp họa đồ

2.1. Phương pháp tiêu chuẩn trở lực tối đa được sửa đổi [5]

Trong quá trình kiểm tra độ bền kéo đơn trục, điều kiện cho lực kéo cực đại được chỉ ra như phương trình (1):

$$dF=d(\sigma S)=Sd\sigma+\sigma dS=0 \quad (1)$$

Trong đó S biểu thị diện tích mặt cắt của mẫu thử và F là lực kéo đo được. Điều kiện được viết lại như sau:

$$\sigma=-d\sigma \frac{S}{dS}=\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2)$$

Dựa trên quan sát, Swift [3] đã trình bày một lý thuyết về tiêu chuẩn lan toả và tiến triển vết nứt để ước tính giới hạn biến dạng dẻo thông qua đường cong giới hạn tạo hình (FLC) cho kim loại tấm. Tiêu chuẩn này đã được công bố rộng rãi để dự đoán (FLC) của các loại vật liệu khác nhau. Sau đó, Hora cùng cộng sự [5] đã phát triển một tiêu chuẩn được gọi là 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:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \varepsilon_1} d\varepsilon_1 \geq \sigma_1 d\varepsilon_1, \quad (3)$$

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:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varepsilon_1} = g(\alpha) H' f(\alpha) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_1}{\partial \beta} &= \frac{\partial \sigma_1}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial \beta} = -\frac{f'(\alpha)}{[f(\alpha)]^2} \bar{\sigma} \frac{\partial \alpha}{\partial \beta} \\ &= -\frac{f'(\alpha)}{[f(\alpha)]^2} H / \left(\frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Trong các phương trình (4) và (5), $H=H(\bar{\varepsilon})$ 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:

$$\beta = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} = \frac{\partial \bar{\sigma} / \partial \sigma_2}{\partial \bar{\sigma} / \partial \sigma_1} \quad (6)$$

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 và đạo hàm thu được là:

$$\frac{\partial \beta}{\partial \varepsilon_1} \approx \frac{\beta}{\varepsilon_1} \quad (7)$$

Các phương trình từ (4) đến (6) được thay vào phương trình (3), dẫn đến một công thức rõ ràng của tiêu chuẩn trở lực tối đa được sửa đổi (MMFC) là:

$$\frac{H'}{H} \geq \frac{1}{g(\alpha)} \left[1 - \frac{f'(\alpha)}{f(\alpha)} \frac{\beta}{\beta'(\alpha)} \frac{1}{\varepsilon_1} \right] \quad (8)$$

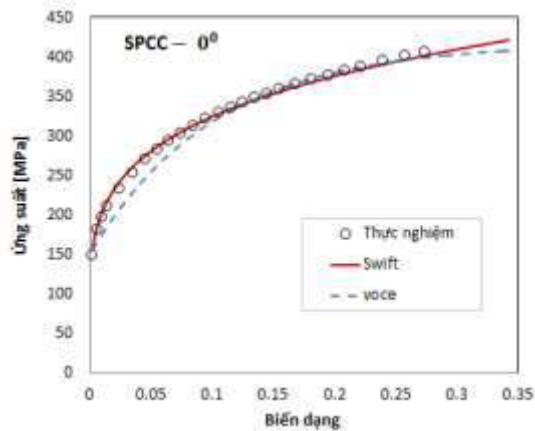
Đối với từng giá trị của α , theo giá trị của β trong phạm vi [-0.5, 1], nếu điểm $(\varepsilon_1^C, \varepsilon_2^C)$ vi phạm điều kiện (8) sẽ được xác định là một điểm trên đường cong giới hạn tạo hình (FLC). Thông thường, một chương trình theo phương pháp lập trình số sẽ được phát triển để thực hiện quy trình phân tích và tính toán (FLC) của các vật liệu được thử nghiệm. Tuy nhiên việc phát triển chương trình thông qua lập trình số là một công việc tốn nhiều công sức và thời gian thực hiện.

2.2. Phương pháp họa đồ cho vật liệu SPCC.

Như thể hiện trong phương trình (8), tính toán có thể thu được thông qua luật cứng hóa đường cong ứng suất-biến dạng. Tại các chế độ biến dạng đặc biệt như biến dạng phẳng ($\beta=0$), biến dạng kéo đơn trục ($\beta=-1/2$) và biến dạng kéo đều đồng thời theo hai phương ($\beta=1$), tất cả các hàm số của phương trình (8) sẽ được tính một cách đơn giản. Để xác minh dự đoán FLC bằng phương pháp họa đồ, thép tấm SPCC với độ dày 1 mm đã được sử dụng cho thực nghiệm kéo để thu được phương trình ứng suất-biến dạng. Trong đó, các thử nghiệm kéo được thực hiện ở tốc độ danh nghĩa là 5mm/phút. Bảng 1 là mô tả chi tiết tính chất cơ học của thép SPCC.

Bảng 1. Thuộc tính của vật liệu SPCC (JIS G3141)

Vật liệu	SPCC		
Hướng cán	0°	45°	90°
Ứng suất chảy (MPa)	166	173	175
Mô đun đàn hồi (E, kN/mm ²)	210.142	210.666	210.601
Độ giãn tương đối (%)	41.452	38.052	40.376
Hệ số dị hướng (r)	1.78	1.64	1.93
Mật độ vật liệu (ρ , kg/mm ³)	7.8e-06		
Hệ số Poat xông	0.3		

**Hình 1.** Đường cong ứng suất chảy của SPCC

Mối quan hệ cứng hóa giữa ứng suất và biến dạng có thể được thể hiện qua mô hình Swift [3] hoặc Voce [12] cho vật liệu tấm SPCC như sau:

$$\text{Swift: } \sigma = C(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \quad (9)$$

$$\text{Voce: } \bar{\sigma} = \sigma_Y + P(1 - \exp(-Q\bar{\varepsilon})) \quad (10)$$

Bảng 2. Các thông số của phương trình Swift và Voce cho vật liệu SPCC theo hướng 0°.

Swift			Voce		
C (MPa)	ε_0	n	σ_Y	P (MPa)	Q
528.89	0.00137	0.213	166	261	7.636

Trong đó, ứng suất tương đương được xác định bởi hàm ứng suất Mises được tính như sau:

$$\text{Mises: } \bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (11)$$

Để tính toán đơn giản (FLC) bằng phương pháp họa đồ cho thép SPCC, vị trí biến dạng

phẳng ($\beta = 0$) sẽ được thay thế vào phương trình (8) thu được:

$$\frac{H'}{H} \geq \frac{1}{g^{PS}} \quad (12)$$

với g^{PS} là hằng số là giá trị của hàm $g(\alpha)$ được xác định tại $\beta = 0$. Tại các vị trí biến dạng quan trọng khác, phương trình (8) có thể được viết lại thành:

$$\frac{H'}{H} \geq A - \frac{B}{\varepsilon} \quad (13)$$

với $A = 1/g(\alpha)$ và $B = (f'/f) \cdot (\beta/\beta')$ là các hằng số.

Từ đó, A và B có thể được biểu thị dưới dạng hàm của (α) (phương trình 14 và 15) ứng với trường hợp vật liệu đẳng hướng thông qua hàm ứng suất Von-Mises.

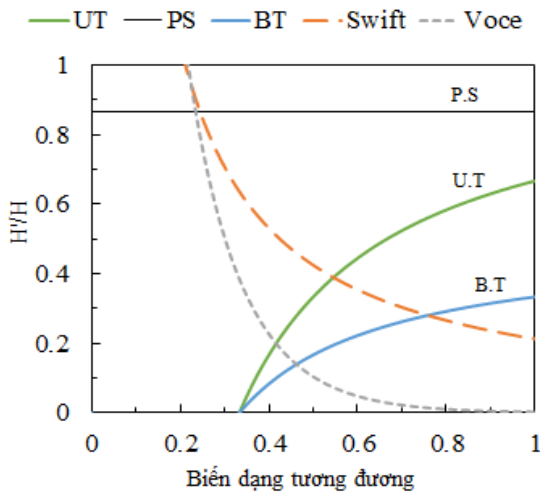
$$A(\alpha) = \frac{2-\alpha}{2\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}} \quad (14)$$

$$B(\alpha) = \frac{(2-\alpha)(2\alpha-1)^2}{6(1-\alpha+\alpha^2)} \quad (15)$$

Bảng 3. Các hằng số biến được xác định ở ba chế độ hình thành cụ thể dựa trên hàm ứng suất Mises

Chế độ		kéo đơn trục (U.T)	Biến dạng phẳng (P.S)	kéo hai phương (B.T)
Mises	α	0	0.5	1
	β	-0.5	0	1
	$A(\alpha)$	1	0.866	0.5
	$B(\alpha)$	1/3	0	0.1667

Việc tính toán cho các chế độ biến dạng đặc biệt quan trọng như biến dạng phẳng (PS) ($\beta=0$), biến dạng kéo đơn trục (UT) ($\beta=-1/2$) và biến dạng kéo đều đồng thời theo hai phương (BT) ($\beta=1$) được lấy các giá trị tương ứng đầu vào trong bảng 3 khi tính toán A và B trong phương trình (13). Dựa trên các giá trị được tính toán và các phương trình đã đề cập ở trên, phương trình (9 và 10) sẽ được vẽ như trong Hình 2 bằng cách áp dụng tương ứng các mô hình cứng hóa Swift và Voce.



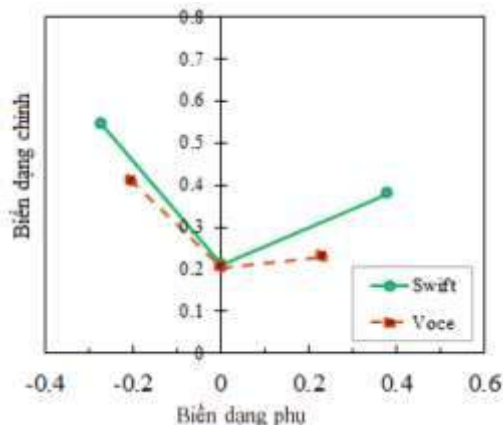
Hình 2. Phương pháp hóa đồ để dự đoán đường cong giới hạn hình thành được thể hiện bởi mối quan hệ giữa hàm ứng suất Mises với mô hình Swift và Voce

Theo phương pháp hóa đồ, các biến dạng dẻo tương đương có thể được xác định. Để tính toán các biến dạng chính và biến dạng phụ, Von-Mises (Phương trình 16, 17) sẽ được sử dụng. Từ đó, giới hạn tạo hình (FLC) sẽ thu được bằng cách nối ba điểm biến dạng như trong Hình 3.

$$\varepsilon_1 = \bar{\varepsilon} / \sqrt{\frac{4}{3}(1 + \beta + \beta^2)} \quad (16)$$

$$\varepsilon_1 = \bar{\varepsilon} / g(\alpha) \quad (17)$$

Trong đó $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ và $\beta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$ lần lượt là biến dạng chính, biến dạng phụ và tỷ lệ biến dạng.



Hình 3. FLC được tính toán dựa trên phương pháp hóa đồ bởi hàm ứng suất của Mises cho vật liệu SPCC với mô hình Swift và Voce

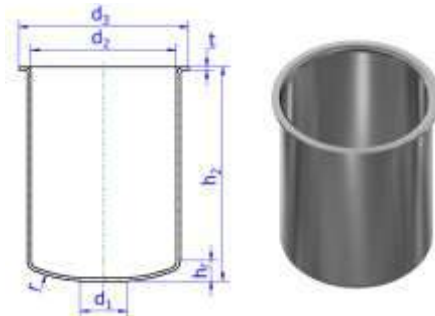
3. Thử nghiệm và mô phỏng

3.1. Mô hình thực nghiệm

3.1.1. Sản phẩm thực nghiệm

Sản phẩm cốt lọc nhiên liệu dùng cho các loại xe ô tô giúp lọc đi những cặn bẩn, rỉ sắt trong nhiên liệu, tạo nên nguồn nhiên liệu sạch cho động cơ. Chi tiết cốt lọc trong nghiên cứu này có hình dáng và kích thước tổng quát như Hình 4 và được dập sâu trên máy thủy lực song động, kích thước của chi tiết thay đổi qua hai trạng thái biến dạng liên tục.

Nghiên cứu với mục đích xác định chiều sâu tối đa có thể đạt được khi xảy ra hiện tượng rách của quá trình thực nghiệm, kết quả đo đạc sẽ được sử dụng làm dữ liệu để so sánh với chiều cao rách của quá trình mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) theo các dữ liệu đường cong giới hạn FLC dự đoán từ phương pháp hóa đồ ứng với mô hình của Swift và Voce.



Hình 4. Kích thước tổng quát và mô hình 3D của chi tiết cốt lọc nhiên liệu

Dưới đây là thông số về kích thước của cốt lọc nhiên liệu trong nghiên cứu :

$$d_1 = 34\text{mm}; d_2 = 108\text{mm}; d_3 = 120\text{mm};$$

$$h_r = 15\text{mm}; r = 100\text{mm}; t = 0.6\text{mm}.$$

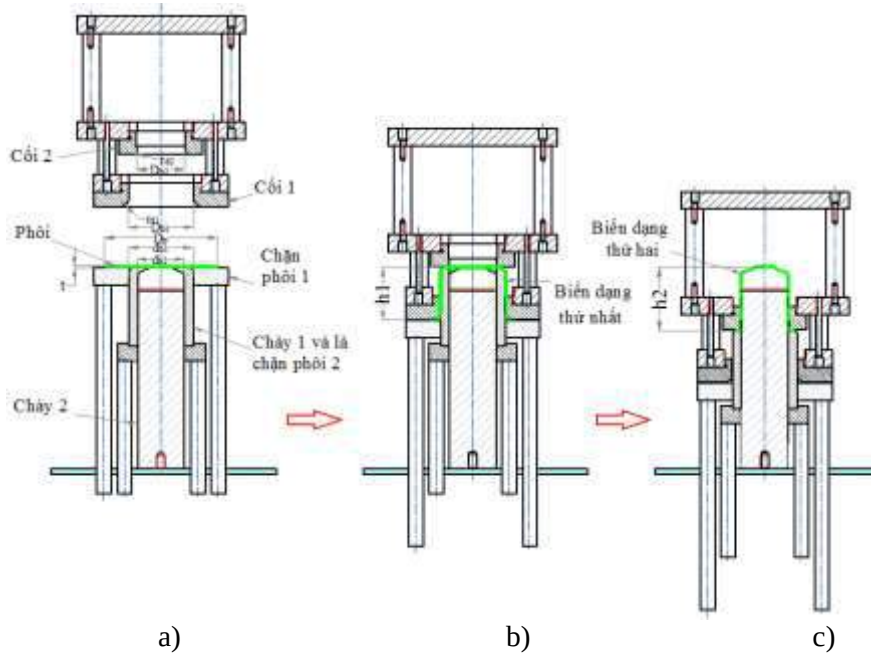
3.1.2. Thiết bị thí nghiệm



Hình 5. Máy thủy lực hành trình kép và bộ khuôn dập sâu

Quá trình dập sâu chi tiết cốc lọc nhiên liệu được gia công trên một máy ép thủy lực hành trình kép với công suất tải tối đa là 50 tấn. Chất bôi trơn sử dụng trong dập sâu là loại dầu thương mại có sẵn trên thị trường. Mô hình thực nghiệm được thể hiện tại Hình 5.

Các trạng thái biến dạng và cấu tạo bộ khuôn dập sâu cốc lọc nhiên liệu được thể hiện tại Hình 6. Bảng 4 là các thông số hình học, công nghệ và tính chất vật lý cơ bản của bộ khuôn dập sâu chi tiết cốc lọc nhiên liệu. Trong đó hệ số ma sát được tham khảo từ nghiên cứu [13].



Hình 6. Mô hình trạng thái biến dạng và cấu tạo bộ khuôn dập sâu cốc lọc nhiên liệu; a) Trạng thái chưa biến dạng ; b) Trạng thái biến dạng thứ nhất; c) Trạng thái biến dạng thứ hai

Bảng 4. Các thông số hình học và công nghệ, vật lý cơ bản của bộ khuôn dập sâu cốc lọc nhiên liệu

Tham số	
Đường kính phôi (D_p)	305 mm
Độ dày phôi (t)	0,6 mm
Đường kính chày bước 1 (d_{b1})	144 mm
Bán kính góc lượn của cối bước 1 (r_{d1})	5 mm
Bán kính góc lượn của chày bước 1 (r_{p1})	8 mm
Đường kính cối bước 1 (D_{b1})	146 mm
Đường kính chày bước 2 (d_{b2})	108 mm
Bán kính góc lượn của cối bước 2 (r_{d2})	5 mm
Đường kính cối bước 2 (D_{b1})	109.8mm
Khoảng cách khe hở giữa chày và cối bước 1 (w_{c1})	1.0 mm
Khoảng cách khe hở giữa chày và cối bước 2 (w_{c2})	0.9 mm
Chiều cao của cốc bước 1 (h_1)	118 mm
Hệ số ma sát giữa chày ép và phôi giả định (μ_p)	0.25
Hệ số ma sát giữa tấm chặn phôi với phôi giả định (μ_h)	0.125
Hệ số ma sát giữa cối ép và phôi giả định (μ_d)	0.125

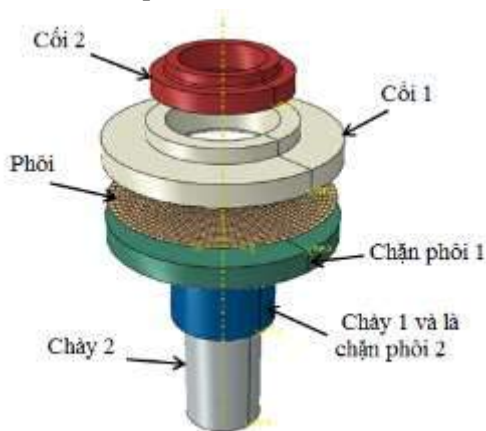


Hình 7. Kết quả thực nghiệm dập sâu chi tiết cốc lọc nhiên liệu bị rách

Kết quả quá trình thực nghiệm được thể hiện như Hình 7 với chiều cao rách của chi tiết cốc lọc nhiên liệu $h_e = 170.6mm$.

3.2. Mô hình mô phỏng

Trong nghiên cứu này, phần mềm ABAQUS (6.13) [14] được sử dụng để mô phỏng quá trình dập sâu chi tiết cốc lọc nhiên liệu với mô hình CAD 3D bộ khuôn dập sâu được thể hiện tại Hình 8. Trong đó chày được giữ cố định, chặn phôi và cối di chuyển theo phương thẳng đứng để đạt kích thước của chi tiết qua hai trạng thái biến dạng tạo hình. Mô hình cứng tuyệt đối được sử dụng cho chày dập vuốt, chặn phôi và cối dập vuốt, có chuyển động được biểu diễn bằng chuyển động của một điểm nút tham chiếu định trước. Phôi kim loại là một tấm phẳng hình tròn được mô hình hóa dạng tấm và lưới được chia theo kiểu phần tử S4R.



Hình 8. Mô hình phần tử hữu hạn 3D (FEM) trong Abaqus

Trong nghiên cứu này, biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo được mô phỏng dựa trên tiêu chuẩn dị hướng của Hill'48 [15]. Hàm ứng suất Hill 48 được biểu diễn như biểu thức (18).

$$\begin{aligned} (f(\sigma))^2 = & F \cdot (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 \\ & + H (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L (\sigma_{yz})^2 + 2M (\sigma_{zx})^2 \\ & + 2N (\sigma_{xy})^2 \end{aligned} \quad (18)$$

trong đó x, y và z lần lượt là hướng cán (RD), hướng ngang (TD) và hướng pháp tuyến (ND), F, G, H, N là các tham số trạng thái dị hướng được tính toán theo công thức (19).

$$\begin{cases} F = \frac{1}{2R_{22}^2} + \frac{1}{2R_{33}^2} - \frac{1}{2R_{11}^2} \\ G = \frac{1}{2R_{11}^2} + \frac{1}{2R_{33}^2} - \frac{1}{2R_{22}^2} \\ H = \frac{1}{2R_{11}^2} + \frac{1}{2R_{22}^2} - \frac{1}{2R_{33}^2} \\ L = \frac{3}{2R_{23}^2}, M = \frac{3}{2R_{13}^2}, N = \frac{3}{2R_{12}^2} \end{cases} \quad (19)$$

Với R_{11} , R_{22} , R_{33} , R_{12} , R_{13} và R_{23} là các tham số tỷ lệ theo hệ số dị hướng. Đối với trường hợp ứng suất phẳng, chỉ cần xác định bốn tham số R_{11} , R_{22} , R_{33} và R_{12} tương ứng, với giả thiết hướng cán (RD) là ứng suất tham chiếu $R_{11} = 1$ các tham số còn lại được xác định lần lượt là 1.0143, 1.2026 và 1.0068 theo phương trình sau:

$$\begin{cases} R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0(r_{90} + 1)}} \\ R_{33} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{(r_0 + r_{90})}} \\ R_{12} = \sqrt{\frac{3(r_0 + 1)r_{90}}{(2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}} \end{cases} \quad (20)$$

Kết quả của phương trình (20) sẽ được sử dụng làm tham số đầu vào cho vật liệu dị hướng trong mô hình vật liệu SPCC để nghiên cứu chiều cao rách trong mô phỏng FEM.

4. Kết quả và thảo luận

Khi thử nghiệm dập sâu vật liệu tấm SPCC. Dựa trên tiêu chuẩn của FLC, biến dạng và ứng suất dẻo tương đương tại các phần tử lưới thay đổi liên tục ứng với chiều cao dập vuốt gia tăng kéo theo là giá trị tiêu chuẩn phá hủy FLC cũng gia tăng. Theo dõi các giá trị dự đoán FLC trên phần tử lưới đến khi xuất hiện vết rách để xác nhận ảnh hưởng của các luật cứng hóa và dự đoán FLC tương ứng của nó đối với chiều cao rách của các mẫu mô phỏng. Ở đây, dữ liệu đầu vào FLC theo phương trình Voce, Swift đã được nhập vào để dự đoán sự xuất hiện rách trong khi dập chi tiết cốc lọc nhiên liệu. Trong mô phỏng FE cho dập sâu chi tiết cốc lọc nhiên liệu, hiện tượng rách xảy ra tại vị trí lưới có giá trị theo tiêu chuẩn phá hủy FLC đạt tới 1.0 đơn vị. Từ đó chiều cao rách của quá trình dập khi mô phỏng sẽ được đo lường và so sánh với thí nghiệm tương ứng như trong bảng 5. Để đánh giá độ chính xác của quá trình mô phỏng FEM, phần trăm sai lệch giữa chiều cao vết rách của mô phỏng FEM bằng mô hình cứng hóa Voce và Swift so với thực nghiệm đo đạc được ước tính như sau:

$$\Delta h(\%) = (|h_{\text{Mô phỏng}} - h_{\text{Thực nghiệm}}|) / h_{\text{Thực nghiệm}} \quad (21)$$

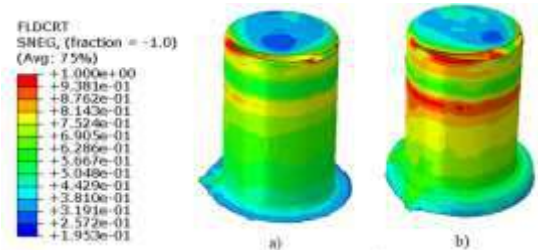
Kết quả mô phỏng quá trình dập chi tiết cốc lọc nhiên liệu với vật liệu SPCC cho thấy, mô hình Swift thể hiện dự đoán tốt chiều cao rách (Hình 9(a) và bảng 5) với sai lệch 1.29%, trong khi đó, mô hình Voce cho thấy dự đoán không chính xác về chiều cao rách (Hình 9(b) và bảng 5) với sai lệch 8,91%.

Bảng 5. Đánh giá độ chính xác của mô phỏng và thực nghiệm

Chiều cao rách	Thực nghiệm		Tỷ lệ		Tỷ lệ
	Swift	Voce	(%)	Swift	Voce
	h_s	h_s	h_v	Δh_s	Δh_v
Giá trị	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)
	170.6	172.8	155.8	1.29	8.91

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã áp dụng phương pháp họa đồ để ước tính và dự đoán biểu đồ giới hạn tạo hình (FLC) của tấm thép SPCC, tiêu chuẩn rách dựa trên FLC dự đoán đã được đưa vào mô hình mô phỏng FEM và so sánh với kết quả thử nghiệm dập sâu chi tiết cốc lọc nhiên liệu. Dự đoán về chiều cao rách sử dụng các giới hạn FLC khác nhau theo luật cứng hóa Voce và Swift đã được so sánh với các thí nghiệm tương ứng. Kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn chỉ ra rằng luật cứng hóa Swift dự đoán chiều cao rách so với thực nghiệm chính xác hơn với sai số chiều cao rách là 1.29% , Trong khi đó luật cứng hóa Voce cho thấy sai lệch chiều cao rách dự đoán là thấp hơn (8.91%). Mô phỏng FEM với luật cứng hóa Swift cung cấp dự đoán phù hợp về chiều cao rách của quá trình dập chi tiết cốc lọc nhiên liệu so với dữ liệu thực nghiệm, đã chứng minh được khả năng và ứng dụng của phương pháp họa đồ để dự báo giới hạn tạo hình cho tấm kim loại SPCC và là cơ sở để ứng dụng phương pháp này cho các sản phẩm công nghiệp có hình dạng phức tạp khác nhau.



Hình 9. Biểu dạng cho đến khi rách của chi tiết cốc lọc nhiên liệu dự đoán theo mô hình a) Swift và b) Voce

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Yue, Z. M., Badreddine, H., Dang, T., Saanouni, K., & Tekkaya, A. E., "Formability prediction of AL7020 with experimental and numerical failure criteria", *Journal of Materials Processing Technology*, 218, pp. 80–88, 2015.
- [2]. Marciniak Z., Kuczynski K., "Limit strains in the processes of stretch forming sheet metal", *Int. J. Mech Sci.*, 9(9), pp. 609–612, 1967.
- [3]. Swift, H. W., "Plastic instability under plane stress", *Journal of the Mechanics and Physics of*

- Solids*, 1(1), 1–18. doi:10.1016/0022-5096(52)90002-1, 1952.
- [4]. Hill, R., “On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1(1), pp. 19-30, 1952.
- [5]. Hora P., Tong L. and Reissner J., “A prediction method for ductile sheet metal failure in FE-simulation”, *Proc. Numisheet’96 Conf. (Dearborn/Michigan)*, pp 252–256, 1996.
- [6]. Pham, Q. T., Nguyen, D. T., Kim, J. J., & Kim, Y. S., “A Graphical Method to Estimate Forming Limit Curve of Sheet Metals”, *Key Engineering Materials*, 794, pp. 55-62, 2019.
- [7]. Pham, Q.-T., Lee, B.-H., Park, K.-C., & Kim, Y.-S., “Influence of the post-necking prediction of hardening law on the theoretical forming limit curve of aluminium sheets”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 140, pp. 521-536, 2018.
- [8]. Pham, Q. T., & Kim, Y. S., “Identification of the plastic deformation characteristics of AL5052-O sheet based on the non-associated flow rule”, *Metals and Materials International*, 23(2), pp. 254-263, 2017.
- [9]. Nguyen, D.-T., Dinh, D.-K., Nguyen, H.-M. T., Banh, T.-L., & Kim, Y.-S., “Formability improvement and blank shape definition for deep drawing of cylindrical cup with complex curve profile from SPCC sheets using FEM”, *Journal of Central South University*, 21(1), pp. 27-34, 2014.
- [10]. Nguyen, D.-T., & Kim, Y.-S., “A numerical study on establishing the forming limit curve and indicating the formability of complex shape in incremental sheet forming process”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(12), pp. 2087-2093, 2013.
- [11]. Duc-Toan, N., Young-Suk, K., & Dong-Won, J., “Coupled thermomechanical finite element analysis to improve press formability for camera shape using AZ31B magnesium alloy sheet”, *Metals and Materials International*, 18(4), pp. 583-595, 2012.
- [12]. Voce E., “The relationship between stress and strain for homogeneous deformation”, *J. Inst. Metals*, 74, pp. 537–562, 1978.
- [13]. M. El Sherbiny, H. Zein, M. Abd-Rabou, and M. El shazly, “Thinning and residual stresses of sheet metal in the deep drawing process,” *Mater. Des.*, vol. 55, pp. 869–879, Mar. 2014.
- [14]. Hibbit D., Karlsson B., Sorensen P. *ABAQUS User’s Manual, Ver. 6.13.1*. Dallas: ABAQUS Inc, 2011.
- [15]. R. Hill, “A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals,” *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 193, no. 1033, pp. 281–297, May 1948.

