

NGHIÊN CỨU DỰ BÁO HIỆN TƯỢNG ĐÀN HỒI SAU BIẾN DẠNG ĐÉO KHI TẠO HÌNH CHỮ U CHO TẤM VẬT LIỆU DP590

Vương Gia Hải, Nguyễn Đức Toàn*

Viện Cơ khí - Đại học Bách khoa Hà Nội, Việt Nam

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, để dự đoán hiện tượng đàn hồi sau biến dạng dẻo khi tạo hình biên dạng chữ U cho vật liệu tấm có độ bền cao DP590, ba mô hình hóa bền vật liệu: mô hình hóa bền đẳng hướng, hóa bền động và hóa bền kết hợp đã được đưa vào phần mềm mô phỏng FEM để dự đoán và so sánh quá trình kéo nén đồng trục cho tấm vật liệu mẫu. Cả 3 mô hình sau đó đã được sử dụng để mô phỏng hiện tượng đàn hồi sau biến dạng dẻo cho chi tiết hình có biên dạng hình chữ U. Để mô tả quá trình này, kết quả biến dạng của hình chữ U từ mô phỏng trong môi trường động lực học (Abaqus/Explicit) sẽ được lấy làm đầu vào cho môi trường tĩnh học (Abaqus/Standard) và cho ra được kết quả dự báo sau biến dạng đàn-dẻo. Kết quả mô phỏng cho thấy quy luật hóa bền đẳng hướng và hóa bền động dự báo không chính xác so với mô hình thực nghiệm qua các thông số đo đạc. Trong khi đó, dự đoán của quy luật hóa bền kết hợp là phù hợp hơn cả khi so sánh với kết quả thực nghiệm. Nghiên cứu cũng xác định được mức độ ảnh hưởng của các tham số tạo hình như: bán kính góc lượn của khuôn trên, khuôn dưới và lực chặn phôi đến các kết quả đo đạc sau khi tạo hình chữ U để từ đó chọn được bộ tham số phù hợp cho kết quả đàn hồi sau biến dạng dẻo là nhỏ nhất thông qua thực nghiệm Taguchi và phân tích phương sai ANOVA.

Từ khóa: Tạo hình chữ U, Mô hình hóa bền vật liệu, Đàn hồi sau biến dạng dẻo, DP590, FEM, ABAQUS

Ngày nhận bài: 15/5/2019; Ngày hoàn thiện: 25/5/2019; Ngày duyệt đăng: 31/5/2019

A STUDY ON PREDICTING SPRING-BACK OF U BENDING FOR HIGH STRENGTH STEEL DP590 SHEET MATERIAL

Vuong Gia Hai, Nguyen Duc Toan*

School of Mechanical Engineering – Hanoi University of Science and Technology

ABSTRACT

In this study, to predict the spring-back of U bending process for high strength steel DP590 sheet material, three hardening models: the isotropic, kinematic and combined isotropic/kinematic hardening models have been imported into FEM simulation software in order to predict and compare with experimental results of high strength steel DP590 sheet material. To simulate spring-back of U bending, the deformed results of U shape from the forming simulation in Abaqus/Explicit should be imported into Abaqus/Standard, and then a static analysis will calculate the spring-back of U bending. The results shown that the isotropic hardening and kinematic hardening laws over- and under-estimate U profile after spring-back, otherwhile the prediction of combined hardening law was in good agreement with experimental result. The study also verify the effect of die radius, punch radius and blank holder force on the U shape in order to select the optimum parameter using Taguchi and ANOVA.

Keywords: U bending, Hardening models of material, Spring-back, DP590, FEM, ABAQUS

Received: 15/5/2019; Revised: 25/5/2019; Approved: 31/5/2019

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

1. Giới thiệu

Ngày nay các sản phẩm được tạo ra từ vật liệu kim loại tấm rất phong phú đa dạng và được ứng dụng rộng rãi trong thực tế nhằm phục vụ cho nhu cầu dân dụng như nắp vỏ bảo vệ các thiết bị điện - điện tử, tạo khung, ống, bồn chứa v.v. Công nghiệp tạo hình tấm kim loại đã và đang được nghiên cứu ứng dụng trong lĩnh vực hàng không - vũ trụ, giao thông như là các nắp, vỏ, khung của thiết bị làm việc với vận tốc cao và áp lực va chạm lớn. Chính vì thế mà nhiều vấn đề của tạo hình biến dạng dẻo tấm kim loại cần được giải quyết trước, trong và sau khi tạo hình. Một trong những vấn đề quan trọng khi tạo hình tấm kim loại là sự xuất hiện hiện tượng đàn hồi sau quá trình tạo hình (đàn hồi ngược) như hình 1. Nghiên cứu về hiện tượng đàn hồi sau quá trình tạo hình biến dạng dẻo của sản phẩm vật liệu kim loại tấm là nhằm tìm hiểu để nâng cao độ chính xác và chất lượng cho quá trình tạo hình bao gồm việc dự đoán hình học sản phẩm cuối cùng sau khi biến dạng dẻo và đàn hồi lại cũng như đưa ra các phương pháp và các công cụ phù hợp để cải thiện độ chính xác của sản phẩm do hiệu ứng đàn hồi ngược sau khi biến dạng dẻo gây ra [1-3]. Hiện nay phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn (FEM), được coi là công cụ hữu hiệu và sử dụng rộng rãi để làm rõ các đặc điểm hình thành, dự đoán và cải thiện chất lượng cho quá trình tạo hình kim loại tấm. Trong đó phần mềm thương mại ABAQUS [4] được các nhà khoa học đánh giá là có khả năng ứng dụng rất cao cho phép dự báo chính xác các hiện tượng xảy ra khi mô tả động lực học, tĩnh học và kết hợp động học/tĩnh học [4]. Đây cũng là đặc điểm quan trọng để sử dụng phần mềm này cho việc mô tả hiện tượng đàn hồi sau khi tạo hình biến dạng dẻo tấm kim loại DP590.

Nghiên cứu này sẽ đi sâu vào tìm hiểu về các tính chất cơ học của vật liệu tấm DP590, quá trình uốn tạo hình biến dạng chữ U từ tấm phẳng nhằm tìm hiểu về các tác động của các

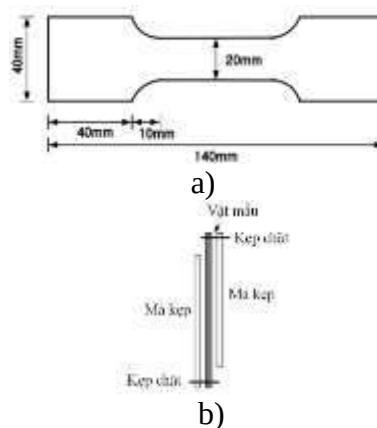
tính chất, mô hình vật liệu, thông số hình học cũng như các tác nhân khác nhau dẫn đến sự hình thành đàn hồi sau khi biến dạng dẻo và dỡ tải để từ đó có thể đưa ra các dự đoán, biện pháp phòng và hạn chế tác động của các tác nhân gây ra hiện tượng đàn hồi sau biến dạng dẻo khi tạo hình biến dạng chữ U tấm kim loại DP590 bằng mô phỏng và thực nghiệm.



Hình 1. Hiện tượng đàn hồi sau khi uốn tạo hình biến dạng chữ U từ tấm phẳng.

2. Vật liệu và mô hình hóa bền

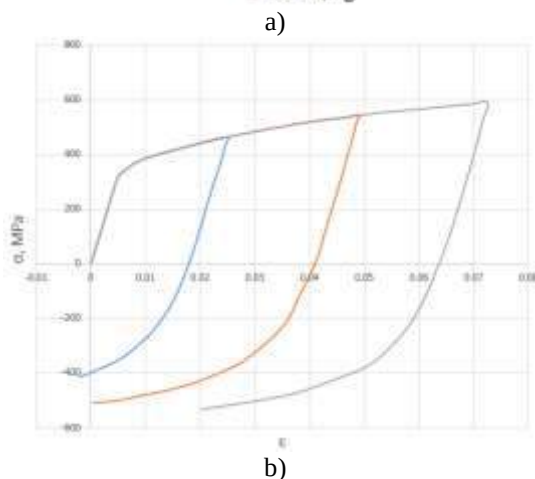
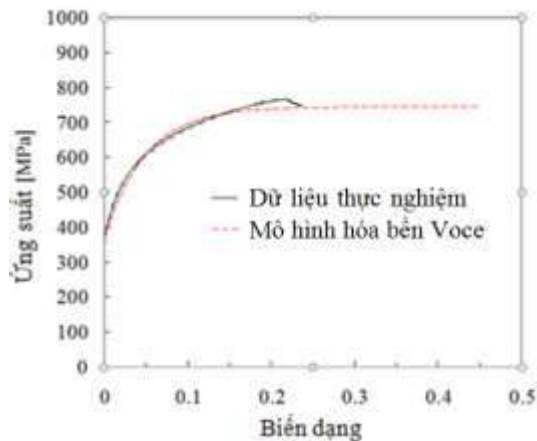
2.1 Vật liệu



Hình 2. Kích thước tiêu chuẩn ASTM E8M của vật mẫu DP590 dày 1,2mm a) và má kẹp hỗ trợ b) trong thử nghiệm kéo nén

Tấm vật liệu DP590 được sử dụng trong thí nghiệm có độ dày 1,2 mm. Kích thước vật mẫu được cắt từ các tấm song song với hướng cán theo tiêu chuẩn ASTM E8M như hình 2 (a). Vật mẫu được cắt bằng máy cắt dây nhằm tránh sai lệch hình học và xử lý sơ bộ bề mặt

sau cắt dây bằng giấy nhám. Hình 3 mô tả đường cong ứng suất-biến dạng khi kéo đứt (a) và khi kéo/nén tại các mức độ biến dạng khác nhau (b) đối với vật liệu được phân tích DP590. Để tấm vật mẫu không bị mất ổn định trong quá trình nén, tốc độ biến dạng khi kéo/nén được lựa chọn thấp xấp xỉ $0,001s^{-1}$ (ứng với tốc độ kéo 0,05mm/s cho tấm vật liệu mẫu có chiều dài cơ sở là 50mm) và kết hợp bố trí 2 tấm má kẹp như biểu diễn trong hình 2(b). Bảng 1 là thành phần hóa học của vật mẫu DP590. Tính chất cơ lý được thể hiện trong bảng 2. Dữ liệu thực nghiệm Mô hình hóa bền Voce



Hình 3. Đường cong ứng suất biến dạng thí nghiệm kéo a) và kéo-nén b) vật mẫu DP590

Bảng 1. Thành phần hóa học của vật liệu mẫu DP590

Nguyên tố (%)					
C	0,098	S	0,003	Cu	0,025
Mn	1,59	Si	0,087	Sn	0,013
Ni	0,02	Fe	Còn lại		

Bảng 2. Tính chất cơ học của vật liệu DP590

Mô đun đàn hồi (GPa)	202
Ứng suất chảy (MPa)	358,7
Độ dẫn tương đối (%)	26,3
Hệ số dị hướng R	0,754

2.2 Mô hình vật liệu

Nghiên cứu này sử dụng luật hóa bền của Voce [5] để biểu diễn quan hệ giữa ứng suất và biến dạng như phương trình (1) (hình 5 (a)).

$$\bar{\sigma} = \sigma_Y + A(1 - \exp(-B\varepsilon_{eq}^{pl})) \quad (1)$$

trong đó, A và B là các hệ số dẻo. $\bar{\sigma}$, ε_{eq}^{pl} , và σ_Y tương ứng là ứng suất tương đương, biến dạng dẻo tương đương, và giới hạn chảy dẻo.

Để mô tả mô hình hóa bền, các bề mặt dẻo Von-Mises vừa dịch chuyển (động), vừa mở rộng (đẳng hướng) được xác định như phương trình (2) [2].

$$f(\sigma) = \frac{1}{2} \xi_j : \xi_j = \frac{1}{3} \bar{\sigma}_{iso}^2 \quad (2)$$

với $\bar{\sigma}_{iso}$ là ứng suất chảy tương đương, ξ là tenxơ trạng thái ứng suất cầu biểu diễn trong phương trình (3) với α là tenxơ ứng suất lệch biểu diễn trong phương trình (4).

$$\xi_j = S_j - \alpha_j \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \varepsilon_{eq}^{pl}}) \quad (4)$$

Với C và γ là các tham số của vật liệu cần được xác định theo quy luật hóa bền.

Trong trường hợp hóa bền đẳng hướng thuần túy, chỉ có tiến triển mở rộng kích thước của bề mặt chảy dẻo khi đó $\alpha=0$. Với dữ liệu thực nghiệm kéo của vật liệu DP590 (hình 3) và phương trình Voce (1) sẽ xác định được các giá trị tương ứng lần lượt của σ_Y , A, và B là 358,70 (MPa), 347,23 (MPa) và 18,583.

Trường hợp hóa bền động thuần túy, phương trình (4) được dùng để xác định các thông số vật liệu của mô hình hóa bền động là C và γ . Dữ liệu α được lấy bằng việc dịch chuyển đường cong ứng suất-biến dạng kéo (phương trình (1)) một lượng bằng đúng giới hạn chảy (σ_Y). Thông qua tính toán dữ liệu tương thích sẽ tìm được C và γ lần lượt là 6452,752 MPa và 18,583.

Với mô hình hóa bền kết hợp, dữ liệu kéo-nén kết hợp (phương trình (5)) được sử dụng để tính các tham số vật liệu C_1 và γ_1 trong phương trình (4) thu được tương ứng là 8472,625 MPa và 40,25

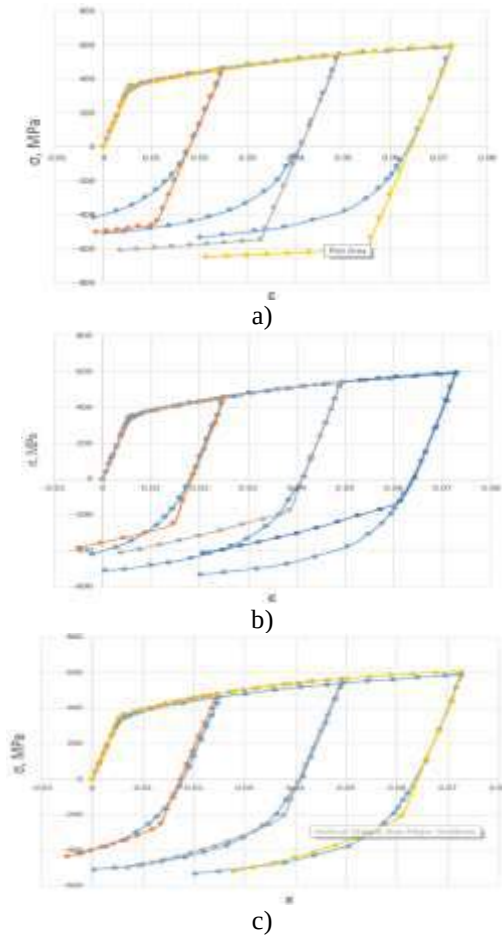
$$\alpha_i = \frac{\sigma_{i(kéo)} + \sigma_{i(nén)}}{2} \quad (5)$$

Trong đó: $\sigma_{i(kéo)}$ và $\sigma_{i(nén)}$ tương ứng là các giá trị ứng suất trong trạng thái kéo và nén tại một mức độ biến dạng bất kỳ.

Khi đó hàm chảy dẻo tương đương theo giá trị biến dạng tương đương phải được tính toán lại bằng phương trình (6).

$$\bar{\sigma}_{iso}(\varepsilon_{eq}^{pl}) = \bar{\sigma}(\varepsilon_{eq}^{pl}) - \alpha(\varepsilon_{eq}^{pl}). \quad (6)$$

Các thông số hóa bền trong phương trình (1) phải được tính mới lại là A_1 và B_1 với dữ liệu ứng suất tương đương từ phương trình (6) và thu được tương ứng là 173,124 MPa và 6,255.

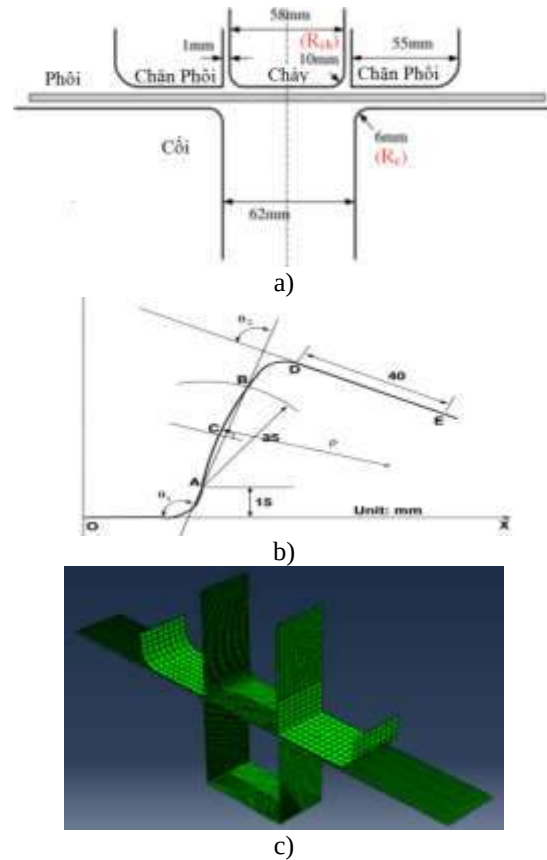


Hình 4. Dự đoán cho những đường cong ứng suất biến dạng sử dụng mô hình hóa bền đẳng hướng (a), động (b) và kết hợp (c)

Dự báo so sánh giữa mô hình hóa bền với dữ liệu thực nghiệm kéo-nén được biểu thị trong Hình 4.

3. Mô phỏng và dự báo sau khi tạo hình chữ U

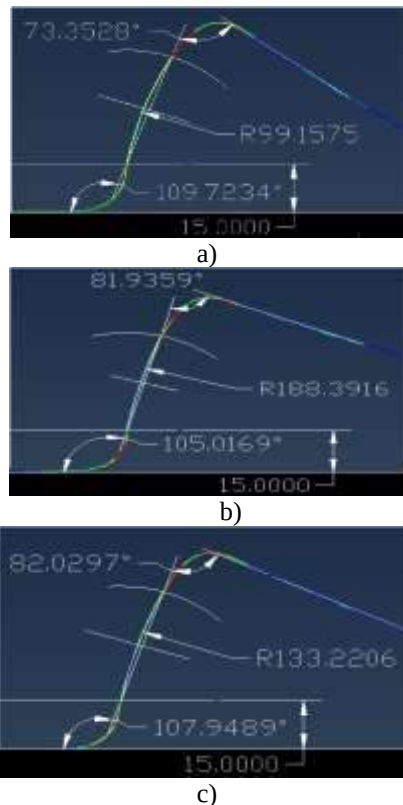
Nhằm đánh giá khả năng dự báo của 3 mô hình hóa bền đến hiện tượng đàn hồi sau biến dạng dẻo khi tạo hình, nghiên cứu này sử dụng mô hình dập uốn chữ U cho việc khảo sát. Để mô phỏng quá trình tạo hình biến dạng chữ U, chảy, cối và tấm chặn được mô hình bằng các phần tử cứng R3D4, mô hình biến dạng kiểu S4R được sử dụng cho các phần tử tấm kim loại. Kích thước trung bình của tấm là 300 mm (chiều dài) x 35 mm (chiều rộng) các kích thước lưới khoảng 1 mm (chiều dài) x 8,75 mm (chiều rộng). Khe hở giữ chày và cối là 2 mm, tấm dày 1,2 mm, lực chặn phôi là 2,5 KN. Tốc độ di chuyển chày được xác định là 0,07 mm/s tương ứng với chiều cao tạo hình cho biến dạng chữ U là 70mm.



Hình 5. Sơ đồ tạo hình chữ U (a), kích thước cần kiểm tra (b), và mô hình mô phỏng (c)

Sơ đồ mô phỏng được thể hiện trong hình 5a, các tham số cần xác định sau khi tạo hình, biến dạng đàn-dẻo thể hiện trong hình 5b bao gồm các kích thước góc (θ_1), (θ_2) và (ρ) [3]. Hình 5c là mô hình phần tử hữu hạn được sử dụng trong nghiên cứu. Kết quả mô phỏng quá trình đàn hồi sau khi biến dạng dẻo được thể hiện trong hình 6 với các kích thước cần kiểm tra đo đạc được thể hiện tương ứng theo các mô hình đẳng hướng thuần túy (ISO), động học thuần túy (KIN) và kết hợp (ISO-KIN). Các dữ liệu đầu ra là các kích thước góc (θ_1), (θ_2) và (ρ) cũng đã được tiến hành so sánh với dữ liệu thực nghiệm (EXP) ứng với từng mô hình đẳng hướng, động học và kết hợp như trong hình 7 a), b) và c).

Qua so sánh (hình 4 và 7) thấy rõ ràng hóa bền đẳng hướng và hóa bền động thuần túy dự báo quá mức và dưới mức ước lượng của tham số cần kiểm tra sau khi tạo hình chữ U. Trong khi đó dự đoán của hóa bền kết hợp cho kết quả là phù hợp tốt nhất với thực nghiệm đo đạc.



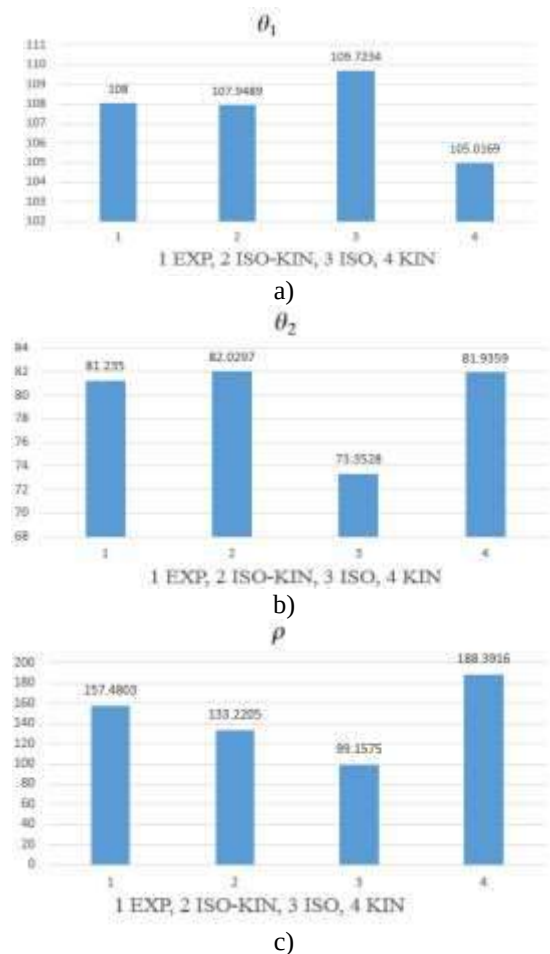
Hình 6. Hiện tượng đàn hồi sau biến dạng tạo hình và dữ liệu đo đạc theo mô hình a) đẳng hướng(ISO), b) động học (KIN) và c) kết hợp (ISO-KIN)

4. Ảnh hưởng của bán kính chày, cối và lực chặn phôi đến đàn hồi sau biến dạng

Để xác định ảnh hưởng của các thông số đầu vào (hình 5 (a)): bán kính chày (R_{ch}) (mm) (A), bán kính cối (R_c) (mm) (B), và lực chặn BHF (KN) (C) đến sự hình thành các yếu tố đầu ra của quá trình đàn hồi sau khi biến dạng đàn-dẻo và từ đó ước tính được bộ thông số hợp lý nhằm giảm thiểu biến dạng này. Các cấp độ khác nhau của các hệ số được lựa chọn như trong bảng 3, phương pháp Taguchi [6] được sử dụng để làm quy hoạch số thí nghiệm tương ứng như trong bảng 4. Tỷ lệ nhiễu S/N được lựa chọn theo điều kiện lớn hơn-thì-tốt hơn (phương trình 7)

$$\eta_i = -10 \log_{10}(Y^2) \quad (7)$$

trong đó Y là ($\beta=180^\circ-\theta_1$), (θ_2) và (ρ) ứng với từng trường hợp tính toán.



Hình 7. So sánh các tham số cần kiểm tra giữa các mô hình và thực nghiệm a) θ_1 , b) θ_2 và c) ρ

Khi (β) , (θ_2) và (ρ) càng lớn thì đàn hồi sau biến dạng tạo hình càng nhỏ chất lượng gia công tạo hình càng tốt đồng thời (β) , (θ_2) và (ρ) càng lớn khi tỉ lệ S/N càng nhỏ. Do vậy tỉ lệ S/N nhỏ nhất thì chất lượng gia công tạo hình là tốt nhất. Ở đây, ảnh hưởng của các tham số (xem hình 5 (a)) bán kính chày (R_{ch}), bán kính cối (R_c) và lực chặn phôi (BHF) tới chất lượng sản phẩm sẽ được thẩm định. Bảng 4 liệt kê các kết quả đo cho bảng L9 và tính toán nhiều tương ứng.

Kết quả phân tích phương sai ANOVA được tính toán và cho trong bảng 5, phản ánh rõ lực chặn (C) ảnh hưởng nhiều nhất đến cả 3 kết quả β , θ_2 , ρ trong đó lần lượt với 82,8%, 67,2% và 80,4% vì vậy lực chặn là tham số ảnh hưởng quan trọng nhất đến chất lượng tạo hình sau khi biến dạng chữ U. Các thông số bán kính chày (A) và cối (B) ảnh hưởng không nhiều đến các kết quả đầu ra: lớn nhất là 25,4% cho ảnh hưởng của bán kính cối đến θ_2 . Bán kính chày ảnh hưởng lớn nhất đến ρ chỉ là 14,9%.

Bảng 3. Hệ số và các cấp độ

TT	Thông số	Các mức
1	Bán kính chày R_{ch} (mm) (A)	4 / 7 / 10
2	Bán kính cối R_c (mm) (B)	2 / 4 / 6
3	Lực chặn BHF (KN) (C)	2,5 / 5,0 / 7,5

Bảng 4. Kết quả đo và tỷ số S/N

	A	B	C	β	S/N_β	θ_2	S/N_{θ_2}	ρ	S/N_ρ
1	4	2	2,5	69,6	-36,8	70,7	-36,9	84,8	-38,5
2	4	4	5,0	76,2	-37,6	75,8	-37,6	145,6	-43,2
3	4	6	7,5	77,9	-37,8	82,7	-38,3	139,8	-42,9
4	7	2	5,0	75,2	-37,5	77,5	-37,7	177,8	-45,0
5	7	4	7,6	75,1	-37,5	78,0	-37,8	156,1	-43,8
6	7	6	2,5	71,7	-37,1	74,0	-37,3	110,3	-40,8
7	10	2	7,5	73,7	-37,3	74,4	-37,4	160,4	-44,1
8	10	4	2,5	69,2	-36,8	72,4	-37,2	111,6	-40,9
9	10	6	0,6	75,0	-37,5	77,1	-37,7	121,7	-41,7

Bảng 5. Phân tích ANOVA cho ảnh hưởng của các tham số

Tham số	Giá trị S/N trung bình ở các mức			Tổng bình phương	phân bố	
	1	2	3			
A	β	-37,4*	-37,3	-37,2	0,082	0,083
	θ_2	-37,6	-37,6*	-37,4	0,083	0,074
	ρ	-41,5	-43,2*	-42,2	4,181	0,149
B	β	-37,2	-37,3	-37,4*	0,088	0,089
	θ_2	-37,4	-37,5	-37,8*	0,283	0,254
	ρ	-42,6	-42,6*	-42,5	1,320	0,047
C	β	-36,9	-37,5	-37,5*	0,819	0,828
	θ_2	-37,2	-37,7	-37,8*	0,750	0,672
	ρ	-40,1	-43,3	-43,6*	22,619	0,804

Dựa vào kết quả phân tích trên có thể lựa chọn bộ thông số hợp lý ứng với cấp độ của các thông số có tỉ số nhiều S/N là nhỏ nhất ($A_2B_3C_3$) tương ứng với bán kính chày (R_{ch}) = 7 mm, bán kính cối là (R_c) = 6 mm, lực chặn phôi (BHF) = 7,5 KN.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã đưa ra các phương án dự báo đường cong quan hệ ứng suất biến dạng khi kéo-nén tấm vật mẫu. Phân tích các mô hình hóa bền vật liệu khác nhau để dự báo chính xác hiện tượng đàn hồi sau khi tạo hình biến dạng dẻo tấm DP590 trong quá trình gia công tạo hình chi tiết hình

dạng chữ U. Để cải thiện và nâng cao chất lượng sản phẩm của quá trình biến dạng tạo hình chữ U, các mô phỏng số FEM kết hợp cùng thuật toán mảng trực giao Taguchi đã đưa ra được ảnh hưởng của các thông số trong khoảng giá trị khảo sát được lựa chọn tới chất lượng sản phẩm. Kết quả thu được trong khoảng giá trị khảo sát của các thông số đầu vào đã chỉ ra rằng lực chặn phôi ảnh hưởng lớn nhất đến chất lượng tạo hình sản phẩm khi mô phỏng. Các tham số được lựa chọn gồm: bán kính chày 7 mm, bán kính cổ 6 mm, lực chặn phôi 7,5 KN được dự đoán là tạo ra được sản phẩm có khả năng tạo hình tốt nhất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Duc-Toan, N., Seung-Han, Y., Dong-Won, J., Tien-Long, B., & Young-Suk, K. "A study on material modeling to predict spring-back in V-bending of AZ31 magnesium alloy sheet at various temperatures". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(5-8), 551–562. doi:10.1007/s00170-011-3828-y, 2011.
- [2]. Nguyen, D.-T., Kim, Y.-S., & Jung, D.-W. "Finite element method study to predict spring-back in roll-bending of pre-coated material and select bending parameters". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(8), 1425–1432. doi:10.1007/s12541-012-0187-z, 2012.
- [3]. Myoung-Gyu Lee, Daeyong Kim, Chongmin Kim, Michael L. Wenner, Kwansoo Chung, "Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic – kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions, part I, II, III", *International Journal of Plasticity* 21 (2005) 915–953, 2005.
- [4]. Hibbit, D., Karlsson, B. and Sorensen, P. *ABAQUS User's Manual*, Ver. 6.13.1. Inc, 2010.
- [5]. E. Voce, *J. Inst. Met.* 74 (1978) 537-562, 1978.
- [6]. Taguchi, G. *On-line Quality Control during Production*. Japan Standard Association, Tokyo, 1981.

