

PHƯƠNG PHÁP MỚI XÁC ĐỊNH CÁC THAM SỐ VẬT LIỆU ĐỂ DỰ ĐOÁN HIỆN TƯỢNG ĐÀN HỒI SAU BIẾN DẠNG TẠO HÌNH KHI UỐN CHI TIẾT HÌNH CHỮ V LÀM TỪ THÉP TẤM SS400 Ở NHIỆT ĐỘ CAO

Vương Gia Hải

Khoa Điện - Cơ

Email: haivg@dhhp.edu.vn

Nguyễn Mạnh Hùng

Khoa Công nghệ thông tin

Email: hungvm@dhhp.edu.vn

Ngày nhận bài: 26/8/2022

Ngày PB đánh giá: 06/9/2022

Ngày duyệt đăng: 15/9/2022

TÓM TẮT: Trong bài báo này trình bày một phương pháp mới để xác định các tham số vật liệu sử dụng trong dự đoán hiện tượng đàn hồi sau biến dạng tạo hình khi uốn chi tiết hình chữ V làm từ thép tấm SS400 ở nhiệt độ cao. Các thực nghiệm thử kéo ở nhiệt độ phòng và nhiệt độ cao được tiến hành trên máy kéo/nén đơn trục. Các dữ liệu thu được từ các thí nghiệm kéo/nén dùng để xác định các tham số của mô hình hóa bền kết hợp đẳng hướng/động sử dụng cho quá trình mô phỏng bằng phần mềm ABAQUS. Việc so sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy sự phù hợp của mô hình mới đề xuất ở nhiệt độ cao theo phương pháp là dựa vào quan hệ của giới hạn chảy và hàm ứng suất ở nhiệt độ phòng và nhiệt độ cao. Kết quả sau khi mô phỏng được so sánh với thực nghiệm khi uốn chi tiết hình chữ V ở nhiệt độ cao đã cho thấy hiệu quả của mô hình mới đề xuất.

Từ khóa: kéo/nén, tạo hình nhiệt độ cao, SS400, FEM, uốn V.

A NEW METHOD FOR DETERMINATION OF MATERIAL PARAMETERS TO PREDICT THE SPRING-BACK AFTER FORMING DEFORMATION WHEN V-BENDING DETAIL FOR SS400 STEEL PLATE AT HIGH TEMPERATURE

ABSTRACT: In this paper, a new method is presented to determine the material parameters used in predicting the spring-back after forming deformation when V-bending details are made of SS400 steel plate at high temperatures. High-temperature and room-temperature tensile tests were carried out on a tension/compression machine. The data obtained from the tensile/compression tests are used to determine the parameters of the isotropic/combined hardening models used for the simulation by ABAQUS software. The

comparison of simulation and experimental results shows that the suitability of the proposed new model at high temperatures according to the method is based on the relationship between yield strength and stress function at room temperature and high temperature. The simulation results are compared with the experiment when bending the V-shaped part at high temperatures, showing the efficiency of the proposed new model.

Keywords: Tension/compression, high temperature forming, SS400, FEM, V-bending.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thép tấm đã và đang được sử dụng rất rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như: Hàng không, vũ trụ, ô tô, đóng tàu,... Có rất nhiều công nghệ gia công khác nhau được ứng dụng trong gia công tấm như: Cắt gọt, hàn, lỏng, uốn, sấn,... [1], [2]. Trong các sản phẩm làm từ thép tấm thì các chi tiết có biên dạng cong được gia công bằng công nghệ uốn chiếm một tỷ trọng khá lớn. Trong quá trình tạo hình kim loại tấm bằng công nghệ uốn hiện tượng đàn hồi sau biến dạng tạo hình là một yếu tố có ảnh hưởng rất lớn đến độ chính xác của sản phẩm. Hiện tượng đàn hồi sau biến dạng tạo hình các chi tiết được gia công bằng phương pháp uốn thường chịu ảnh hưởng rất lớn từ các thông số công nghệ như: Bán kính chày uốn, vật liệu, chiều dày chi tiết, vận tốc chày uốn, nhiệt độ gia nhiệt khi uốn,... Trong các thông số công nghệ ảnh hưởng đến hiện tượng đàn hồi sau biến dạng tạo hình thì nhiệt độ nung phôi là một thông số có ảnh hưởng rất lớn, có nhiều nghiên cứu [3]–[7] đã chỉ ra rằng khi nhiệt độ càng cao thì giá trị đàn hồi sau biến dạng tạo hình càng giảm. Các nghiên cứu này cũng đã sử dụng phương pháp mô phỏng và thực nghiệm để đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ đến hiện tượng đàn hồi sau biến dạng tạo hình.

Trong nghiên cứu này, để dự đoán chính xác hiện tượng đàn hồi sau biến dạng tạo hình khi uốn chi tiết hình chữ V làm từ thép tấm SS400 ở nhiệt độ cao.

Trước tiên các mẫu thử kéo được cắt từ tấm kim loại song song với hướng cán và tiến hành thực nghiệm kéo đơn trục ở nhiệt độ phòng, 300⁰C và 600⁰C. Mô hình Voce's [8] đã được sử dụng để mô tả đường cong ứng suất ở điều kiện nhiệt đẳng hướng từ các dữ liệu thử nghiệm. Các tham số của mô hình hóa bền được xác định nhờ cơ cụ Solver trong phần mềm Excel 2013 bằng phương pháp tương thích bình phương bé nhất dựa trên các dữ liệu thực nghiệm. Phần mềm phân tích phần tử hữu hạn ABAQUS được sử dụng để mô phỏng quá trình uốn chi tiết hình chữ V ở điều kiện nhiệt độ cao. Mô hình vật liệu sử dụng cho quá trình mô phỏng là mô hình kết hợp đẳng hướng/động, mô hình này đã được nhiều nhà khoa học sử dụng khi phân tích quá trình biến dạng ở điều kiện nhiệt đẳng hướng [9]–[11] và cho thấy sự ưu việt của mô hình. Trong nghiên cứu này đã đề xuất hai phương pháp để xác định các tham số hóa bền ở nhiệt độ cao (300⁰C và 600⁰C) khi uốn thép tấm SS400, phương pháp thứ nhất là dựa vào quan hệ giữa giới hạn chảy của vật liệu ở nhiệt độ cao và nhiệt độ phòng và phương pháp thứ hai là hàm quan hệ ứng suất giữa nhiệt độ cao và nhiệt độ phòng. Sau khi mô phỏng và so với dữ liệu thực nghiệm cho thấy cả hai phương án đề xuất đều cho kết quả gần với thực nghiệm nhưng phương án thứ hai cho kết quả chính xác hơn cả.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU, CƠ SỞ LÝ LUẬN

Công nghệ gia công có gia nhiệt hiện nay cũng đã có một số nghiên cứu trong và ngoài nước đã thực hiện và cho kết quả khả quan như đã trình bày trong mục 1. Tuy nhiên các nghiên cứu đó chưa có nghiên cứu nào tập trung vào thép tấm SS400, một mác thép được sử dụng phổ biến trong gia công kết cấu thép và đóng tàu ở khu vực Hải Phòng nói riêng và ở Việt Nam nói chung. Mặt khác, hiện nay đa phần các nghiên cứu là sử dụng các mô hình vật liệu đã xây dựng từ trước và có thể phù hợp với một mức độ nhất định tùy từng loại vật liệu mà chưa hẳn đã phù hợp hoàn toàn.

Trong nghiên cứu đã tiến hành thực nghiệm ở ba mức nhiệt độ: nhiệt độ phòng, 300°C và 600°C là do ở 300°C là ngưỡng của biến dạng nguội, dưới 300°C là biến dạng nguội. Còn ở 600°C là biến dạng nửa nóng. Do đó ở ngưỡng nhiệt độ 300°C và 600°C có sự chuyển biến về giá trị mô đun đàn hồi E, thông thường ở nhiệt độ phòng thì mô đun đàn hồi E là tuyến tính, nhưng khi ở 300°C trở lên, đặc biệt là ở tầm 600°C thì E lại là phi tuyến. Chính vì đó là mức nhiệt ở các ngưỡng thay đổi của E nên nó sẽ xảy ra quá trình biến dạng khác nhau, biến dạng nguội thường ở dưới 300°C, biến dạng nửa nóng từ 300°C đến 600°C. Hệ số E chịu ảnh hưởng rất lớn bởi nhiệt độ, khi nhiệt độ càng cao thì E càng giảm và khi kim loại nóng chảy thì hệ số E = 0. Ngoài ra, khi nhiệt độ thay đổi quá cao (vượt quá mức 727°C với thép cacbon) thì sẽ xảy ra hiện tượng thay đổi cấu trúc của vật liệu, mà trong giới hạn của nghiên cứu chỉ nghiên cứu tác động của nhiệt độ đến tính công nghệ của thép khi gia công uốn mà không làm thay đổi cấu trúc của vật liệu gia công. Khi sử dụng những dữ

liệu thu được từ các thực nghiệm thử kéo thông qua các mô hình vật liệu truyền thống xác định các tham số của quá trình mô phỏng uốn cho kết quả chưa phù hợp với giá trị thực tế thực nghiệm. Do đó nghiên cứu đã đề xuất một phương pháp mới xác định các thông số cho quá trình mô phỏng uốn chi tiết hình chữ V ở nhiệt độ cao.

Phương pháp nghiên cứu của nhóm thực hiện trong bài báo là nghiên cứu lý thuyết kết hợp với làm thực nghiệm. Nhóm đã nghiên cứu một số công trình đã công bố về các mô hình vật liệu đã có, sau đó căn cứ vào cơ tính của thép SS400 xây dựng sơ đồ hệ thống gia nhiệt và chế tạo hệ thống. Tiến hành thực nghiệm uốn có gia nhiệt với hệ thống được chế tạo. Từ kết quả thực nghiệm so sánh với các mô hình đã có và mô hình mới đề xuất cho thấy mô hình vật liệu mới đề xuất phù hợp hơn với vật liệu SS400.

3. VẬT LIỆU VÀ MÔ HÌNH HÓA BỀN

3.1 Vật liệu

Thí nghiệm này xác định các hệ số cơ bản trong mô hình vật liệu Voce's [8] để làm đầu vào cho thí nghiệm mô phỏng xác định lực uốn tạo hình. Vật liệu được sử dụng cho nghiên cứu này là thép tấm SS400, theo tiêu chuẩn JISG 3101[12] có thành phần hóa học như Bảng 1.

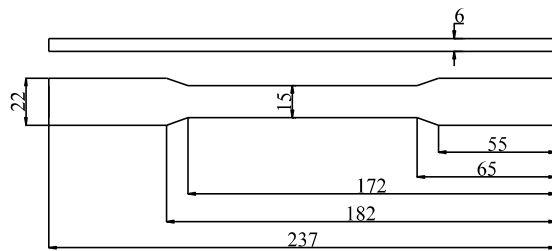
Bảng 1. Thành phần hóa học thép SS400

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,19-0,21	0,05-0,17	0,4-0,6	0,04	0,05	≤0,3

Trong nghiên cứu này, cơ tính của vật liệu sẽ được xác định ở các điều kiện nhiệt độ khác nhau là: nhiệt độ phòng (32°C), 300°C và 600°C. Các mẫu thử kéo được gia công bằng cắt dây theo hướng

cán của tấm thép dày 6 mm. Sau khi cắt dây mẫu thử kéo được xử lý qua bằng giấy giáp. Kích thước mẫu thử kéo theo tiêu chuẩn của nhà nước TCVN 197-85(197-

2000), mẫu có kích thước và hình dạng như Hình 1 (a), (b) và (c) tương ứng là mẫu thử kéo khi gia công cắt dây CNC và sau xử lý bề mặt bằng giấy giáp.



(a)



(b)



(c)

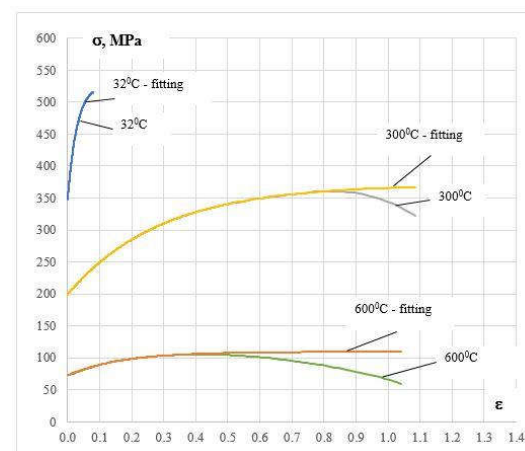
Hình 1. Mẫu thử kéo thiết kế (a), gia công trên máy cắt dây CNC (b) và sau xử lý bề mặt (c)

Thử nghiệm kéo cho các mẫu được thực hiện tại các điều kiện nhiệt độ khác nhau trên máy kéo nén Hung Ta H-200A. Quá trình thử kéo có gia nhiệt và gá đặt bộ gia nhiệt trên thiết bị được thể hiện trong Hình 2.

Kết quả thực nghiệm thử kéo ở các điều kiện nhiệt độ khác nhau thể hiện trong Hình 3.



Hình 2. Hệ thống thử kéo có gia nhiệt



Hình 3. Biểu đồ so sánh mô hình Voce và dữ liệu thực nghiệm ứng suất biến dạng ở nhiệt độ phòng và nhiệt độ cao

3.2 Nhận dạng các tham số của mô hình vật liệu

Để nhận dạng các thông số của mô hình vật liệu tương thích phù hợp với các dữ liệu sau khi thử kéo theo qui luật hóa bền của Voce's [8], các đường cong ứng suất - biến dạng công thức (1) được sử dụng để xác

định các tham số cho mô hình hóa bền kết hợp. Phần mềm Excel 2013 với công cụ SOLVER dựa trên phương pháp tổng bình phương sai lệch nhỏ nhất để dàng tìm ra các hệ số của phương trình (1) được trình bày trong Bảng 2. Các hệ số thu được sẽ được sử dụng để khai báo trong mô hình vật liệu đầu vào khi thực hiện các mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus.

$$\bar{\sigma} = \sigma_Y + A_1(1 - \exp(-B_1 \varepsilon_{eq}^{pl})) + \frac{C_1}{\gamma_1}(1 - e^{-\gamma_1 \varepsilon_{eq}^{pl}}) \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}_{iso} = \sigma_Y + A_1(1 - \exp(-B_1 \varepsilon_{eq}^{pl})) \quad (2)$$

$$\alpha_i = \frac{C_1}{\gamma_1}(1 - e^{-\gamma_1 \varepsilon_{eq}^{pl}}) \quad (3)$$

Trong đó: σ_Y là giới hạn chảy, A_1 , B_1 , C_1 và γ_1 là các tham số hóa bền vật liệu, $\bar{\sigma}$ là ứng suất tương đương, ε_{eq}^{pl} là biến dạng tương đương. Tham số C_1 và γ_1 được xác định từ giá trị ứng suất ngược α_i theo công thức (3). Tham số A_1 và B_1 được xác định theo công thức (2). Các tham số khác sử dụng cho mô phỏng dự đoán hiện tượng đàn hồi sau biến dạng tạo hình khi uốn chi tiết hình chữ V ở các điều kiện khác nhau được thể hiện trong Bảng 3.

Để xác định hàm ứng suất ngược $\bar{\alpha}_i$ ở nhiệt độ cao, nghiên cứu đề xuất hai phương án. Phương án thứ nhất xác định theo quan hệ giữa giới hạn chảy ở nhiệt độ cao và nhiệt độ phòng theo công thức (4).

$$\bar{\alpha}_i = \left(\frac{\sigma_{y_{300;600}}}{\sigma_{y_{32}}} \right) \times \alpha_{300;600} \quad (4)$$

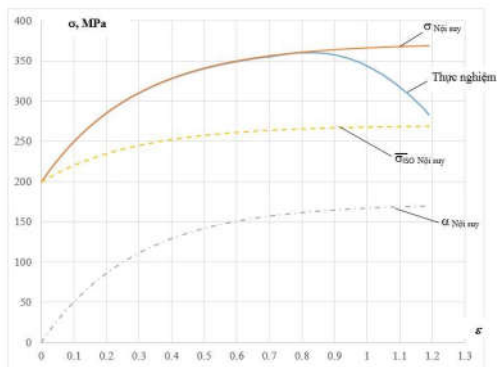
Trong đó $\sigma_{y_{32}}$, $\sigma_{y_{300;600}}$ lần lượt là giới hạn chảy của vật liệu ở nhiệt độ phòng (32°C), 300°C và 600°C tương ứng là: 348 MPa, 199,3 MPa và 72,43 MPa. Và $\alpha_{300;600}$ là giá trị ứng suất ngược thu được khi thực nghiệm thử kéo ở nhiệt độ 300°C và 600°C, khi đó $\bar{\alpha}_i = 0,572701 \times \alpha_{300}$ và $\bar{\alpha}_i = 0,208132 \times \alpha_{600}$.

Từ các dữ liệu xác định giá trị ứng suất ngược (α) phụ thuộc vào (ε) theo phương trình (3), dựa trên mối quan hệ giữa ứng suất ngược (back-stress) (α) và biến dạng ta có thể xác định được các thông số biến cứng mới C_1 và γ_1 của mô hình kết hợp theo phương trình (2) bằng phần mềm tính toán Excel 2013 theo phương pháp tổng bình phương nhỏ nhất được trình bày trong Bảng 2 thể hiện trên hình 4 và hình 5.

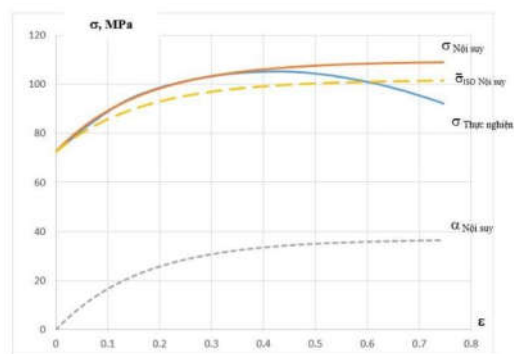
Những dữ liệu trên đã được sử dụng để xác định các tham số hóa bền A_1 và B_1 của mô hình kết hợp dựa theo phương trình (2) bằng phần mềm tính toán Excel 2013 theo phương pháp tổng bình phương nhỏ nhất trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Các hệ số hóa bền của mô hình đẳng hướng và động học ở ba điều kiện nhiệt độ khác nhau cho phương án quan hệ giới hạn chảy ở nhiệt độ cao và nhiệt độ phòng

Nhiệt độ (°C)	σ_Y (MPa)	A_1 (MPa)	B_1	C_1 (Mpa)	γ_1
300	199,3	73,4856	3,45	339,839	3,45
600	72,43	29.2121	6,0145	46,178	6,014



Hình 5. Xác định các tham số biến cứng của mô hình kết hợp dựa trên dữ liệu thử nghiệm ở 300°C cho phương án quan hệ



Hình 4. Xác định các tham số biến cứng của mô hình kết hợp dựa trên dữ liệu thử nghiệm ở 600°C cho phương án quan hệ giới hạn chảy

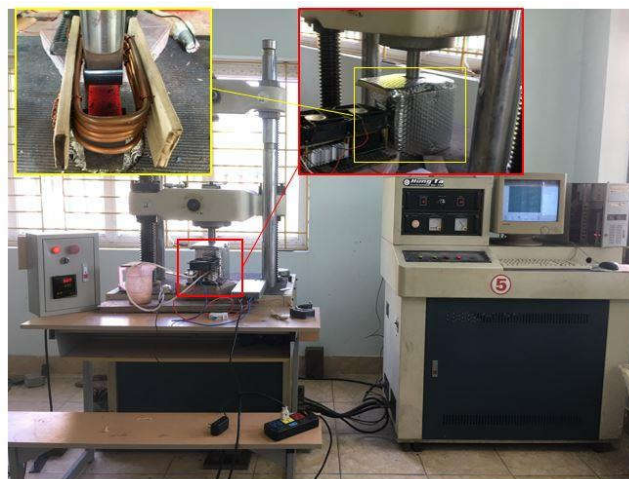
4. THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG UỐN CHI TIẾT HÌNH CHỮ V Ở NHIỆT ĐỘ CAO

4.1 Thực nghiệm

Hệ thống thiết bị thực nghiệm uốn chi tiết hình chữ V làm từ thép tấm SS400 được thiết kế và lắp đặt như hình 6. Khi tiến hành thử nghiệm uốn có gia nhiệt, phôi uốn sẽ được nung nóng đến nhiệt độ cần uốn (300⁰ và 600⁰) nhờ thiết bị nung

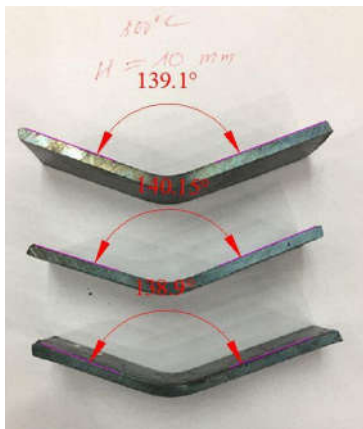
cảm ứng từ. Để tránh hiện tượng thoát nhiệt ra môi trường xung quanh trong quá trình uốn, toàn bộ chày, cối và phôi uốn được đặt trong một hộp bảo ôn được bao quanh là lớp bông thủy tinh cách nhiệt.

Hệ thống làm việc chính xác tại các nhiệt độ cần nung là nhờ bộ điều khiển nhiệt độ được lắp trên hệ thống, bộ điều khiển nhiệt độ này sẽ giúp duy trì nhiệt độ ổn định cần thiết của phôi trong suốt quá trình uốn.

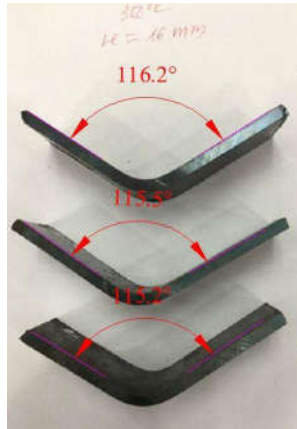


Hình 6. Lắp đặt hệ thống thực nghiệm uốn chi tiết hình chữ V có gia nhiệt bằng cảm ứng điện từ

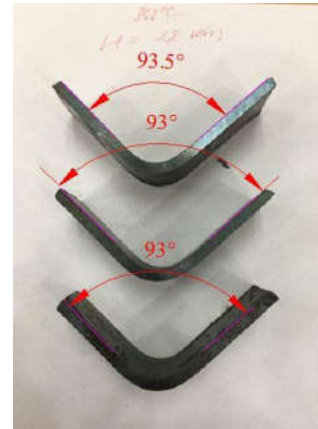
Kết quả thực nghiệm quá trình uốn chi tiết hình chữ V ở 300°C được thể hiện trong hình 6 và Bảng 3. Còn ở 600°C được thể hiện trong hình 7 và Bảng 4.



(a) H = 10mm



(b) H = 16mm

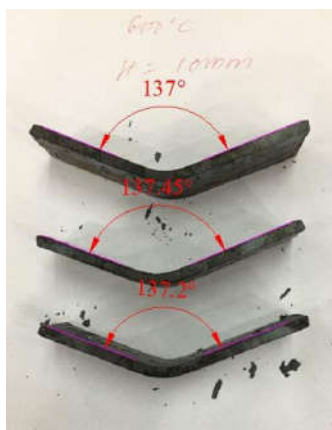


(c) H = 22mm

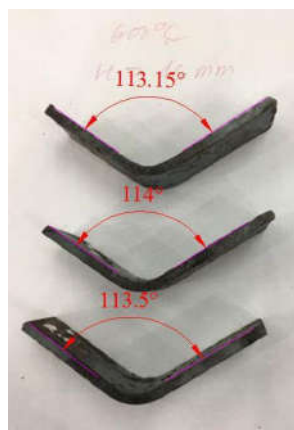
Hình 7. Hình ảnh sản phẩm uốn hình chữ V ở 300°C

Bảng 3. Góc biến dạng đàn hồi θ_{sp} sau quá trình uốn chi tiết hình chữ V ở 300°C

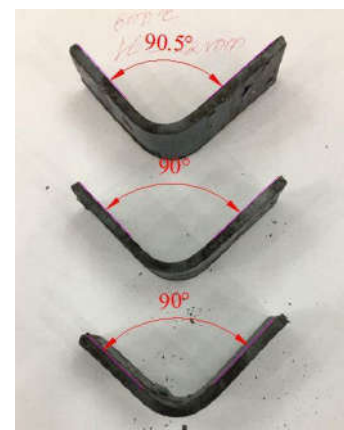
Lượng dịch chuyển của chày H (mm)	Góc uốn θ_0	Góc uốn chi tiết sau khi biến dạng đàn hồi θ_0				Góc biến dạng đàn hồi θ_{sp}			
		Mẫu			Trung bình	Mẫu			Trung bình
		1	2	3		1	2	3	
10	136	139,1	140,15	138,9	139.38	3,1	4,15	2,9	3,38
16	112	116.2	115.5	115.2	115.63	4,2	3,5	3,2	3,63
22	88	93,5	93,0	93,0	93.167	5,3	5,0	5,0	5,167



(a) H = 10mm



(b) H = 16mm



(c) H = 22mm

Hình 8. Hình ảnh sản phẩm uốn hình chữ V ở 600°C

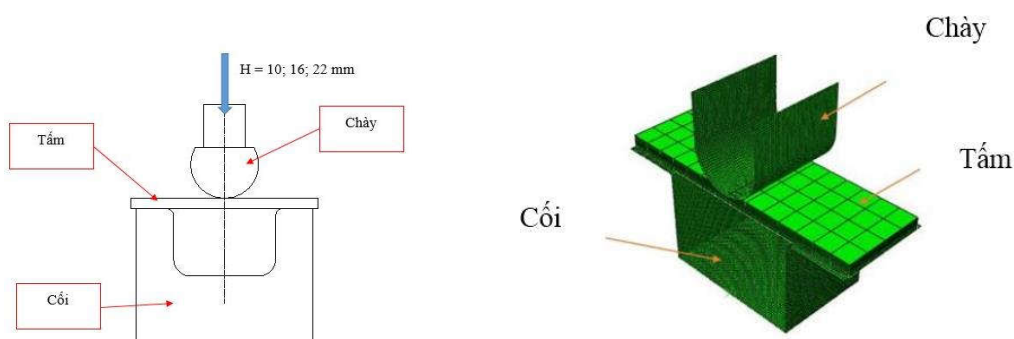
Bảng 4. Góc biến dạng đàn hồi θ_{sp} sau quá trình uốn chi tiết hình chữ V ở 6000C

Lượng dịch chuyển của chày H (mm)	Góc uốn trước springback ⁽⁰⁾	Góc uốn chi tiết sau khi springback ⁽⁰⁾				Góc springback θ_{sp} ⁽⁰⁾			
		Mẫu			Trung bình	Mẫu			Trung bình
		1	2	3		1	2	3	
10	136	137	137.45	137.2	137.22	1,0	1,45	1,2	1,22
16	112	113.15	114	113.5	113.55	1,15	2,0	1,5	1,55
22	88	90.5	90	90	90.167	2,05	2,0	2,0	2,167

4.2 Phân tích phần tử hữu hạn uốn chi tiết hình chữ V khi uốn ở nhiệt độ cao

Để dự đoán hiện tượng đàn hồi sau biến dạng tạo hình khi uốn thép tấm SS400 sử dụng mô hình hóa bền kết hợp đẳng hướng/động học. Các tham số đầu vào sử dụng cho mô phỏng trong bảng 2 và bảng 5.

Nghiên cứu sử dụng phần mềm ABAQUS để mô phỏng quá trình uốn, kích thước phôi sử dụng cho thực nghiệm uốn là 5x35x110 mm (dày x rộng x dài). Mô hình mô phỏng như trong hình 8.

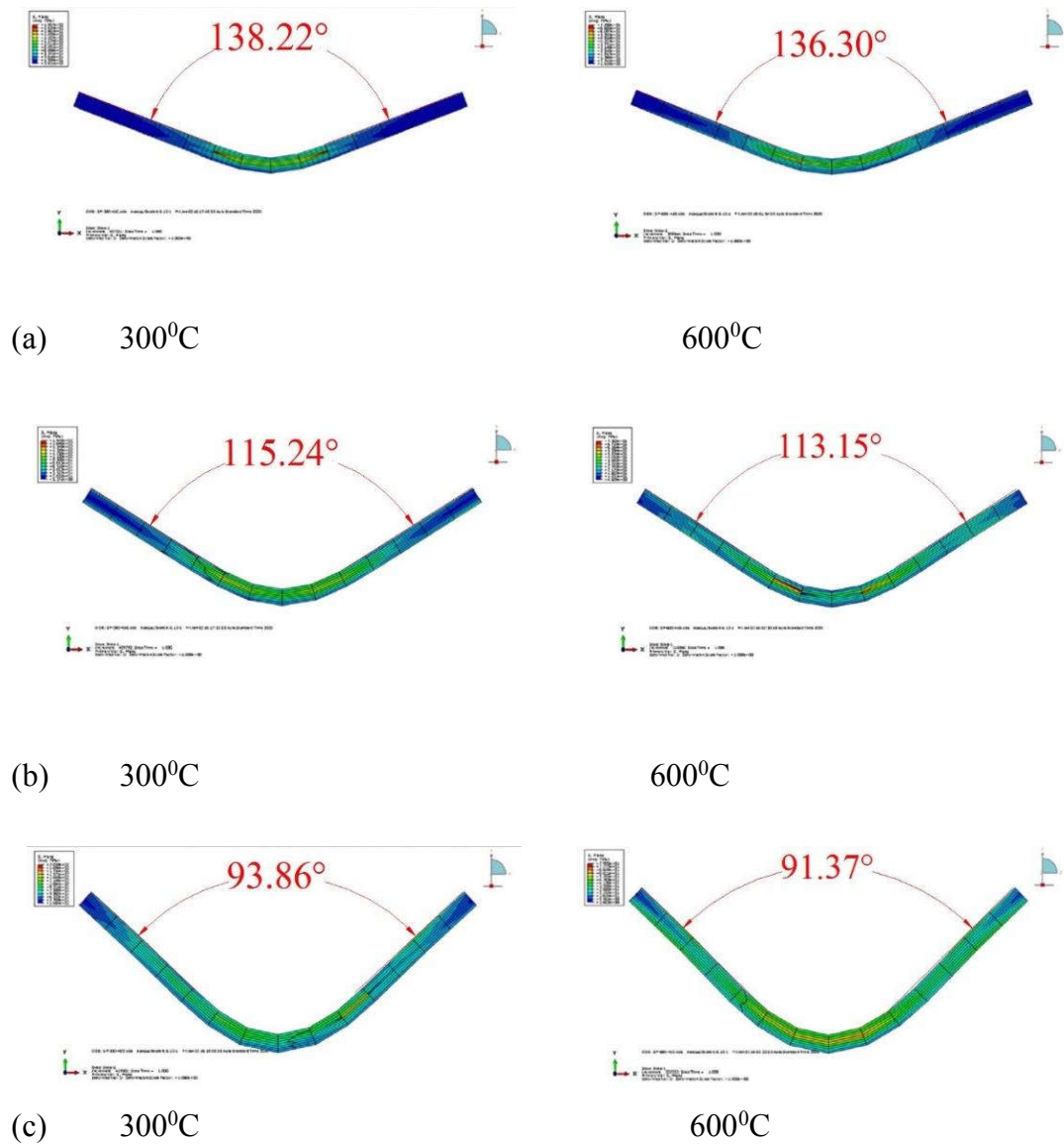


Hình 9. Mô hình mô phỏng uốn V

Kết quả mô phỏng uốn chi tiết hình chữ V ở nhiệt độ phòng được trình bày trong hình 9.

Bảng 5. Material attribute parameters for numerical simulation

Parameters	Temperature (°C)	Bending speed (mm/s)	Thickness sheet (mm)	Poisson's ratio	Young's Modulus (MPa)	Yield stress (MPa)
Levels	32	1	6	0.3	213000	348
	300	1	6	0.3	184410	199.3
	600	1	6	0.3	107640	72.43



Hình 10. Kết quả mô phỏng khi uốn chi tiết hình chữ V ở nhiệt độ 3000C và 6000C với chiều sâu uốn (a) $H = 10\text{mm}$; (b) $H = 16\text{mm}$ và (c) $H = 22\text{mm}$

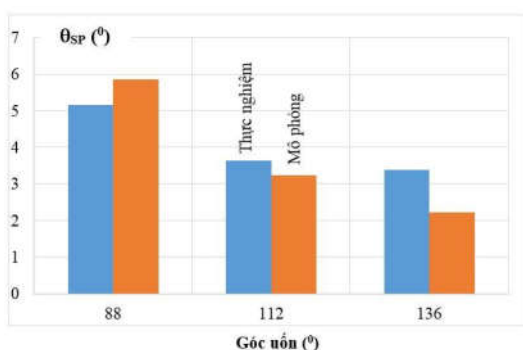
So sánh kết quả giữa thực nghiệm và mô phỏng ở 300°C được trình bày trong bảng 6 và ở 600°C trình bày trong Bảng 7. Sai lệch góc đàn hồi ($\Delta\alpha$) giữa mô phỏng và thực nghiệm được tính toán theo phương trình (5).

$$\Delta\alpha = \alpha_{\text{mp}} - \alpha_{\text{tn}} \quad (5)$$

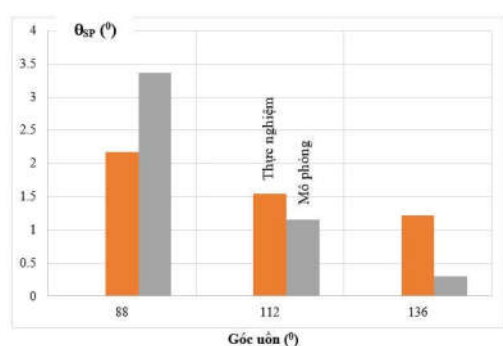
Từ biểu đồ Hình 6 và Hình cho ta thấy, cả khi thực nghiệm và mô phỏng thì khi góc uốn càng cao thì giá trị biến dạng đàn hồi càng giảm. Và sai lệch giữa thực nghiệm và mô phỏng lớn nhất là $1,63^\circ$ ở 300°C và $1,2^\circ$ ở 600°C.

Bảng 6. So sánh góc spring-back thực nghiệm và mô phỏng ở 3000C

Góc uốn ($^{\circ}$) thép tấm SS400 ở 300 $^{\circ}$ C	Góc sau khi biến dạng đàn hồi ($^{\circ}$)				Sai lệch $\Delta\alpha$ ($^{\circ}$)
	Thực nghiệm α_{tn}	Mô phỏng α_{mp}	Góc biến dạng đàn hồi thực nghiệm θ_{SPTN}	Góc biến dạng đàn hồi mô phỏng θ_{SPmp}	
88 $^{\circ}$	93,167	93,86	5,167	5,86	0,693
112 $^{\circ}$	115,63	115,24	3,633	3,24	-0,393
136 $^{\circ}$	139,38	138,22	3,383	2,22	- 1,63



Hình 6. Biểu đồ so sánh góc biến dạng đàn hồi giữa thực nghiệm và mô phỏng ở 3000C



Hình 12. Biểu đồ so sánh góc biến dạng đàn hồi giữa thực nghiệm và mô phỏng ở 6000C

Bảng 7. So sánh góc spring-back thực nghiệm và mô phỏng ở 6000C

Góc uốn ($^{\circ}$) thép tấm SS400 ở 600 $^{\circ}$ C	Góc sau khi biến dạng đàn hồi ($^{\circ}$)				Sai lệch $\Delta\alpha$ ($^{\circ}$)
	Thực nghiệm α_{tn}	Mô phỏng α_{mp}	Góc biến dạng đàn hồi thực nghiệm θ_{SPTN}	Góc biến dạng đàn hồi mô phỏng θ_{SPmp}	
88 $^{\circ}$	90,167	91,37	2,167	3,37	1,203
112 $^{\circ}$	113,55	113,15	1,55	1,15	-0,4
136 $^{\circ}$	137,22	136,30	1,217	0,3	-0,917

Từ kết quả so sánh góc biến dạng đàn hồi giữa thực nghiệm và mô phỏng ở nhiệt độ cao (300 $^{\circ}$ C và 600 $^{\circ}$ C) trình bày ở trên, ta thấy sai lệch giữa thực nghiệm và mô phỏng lớn nhất khi uốn ở 300 $^{\circ}$ C và 600 $^{\circ}$ C lần lượt là 1,63 $^{\circ}$ và 1,2 $^{\circ}$. Sai lệch là tương đối nhỏ điều đó chứng tỏ mô hình đã đề xuất là khá tối ưu.

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này đã tiến hành xây dựng hệ thống thực nghiệm thử kéo và thử uốn có gia nhiệt. Kết quả thực nghiệm thử kéo có gia nhiệt ở ba điều kiện nhiệt độ: nhiệt độ phòng (32°C), 300°C và 600°C đã chỉ ra khi nhiệt độ càng cao thì cơ tính của vật liệu càng giảm xuống do đó khả năng gia công tạo hình sẽ dễ dàng hơn. Nghiên cứu đã đưa ra phương pháp mới xác định các tham số hóa bền của mô hình kết hợp đẳng hướng/động đó là tỷ lệ giữa giới hạn chảy của vật liệu ở nhiệt độ cao với nhiệt độ phòng. Kết quả phân tích phần tử hữu hạn bằng phần mềm ABAQUS của phương án đề xuất so sánh với kết quả uốn thực nghiệm cho thấy mô hình mới đề xuất cho độ chính xác cao và phù hợp. Với kết quả của nghiên cứu cho thấy phương án mới đề xuất đem lại hiệu quả cao trong việc dự đoán hiện tượng đàn hồi sau biến dạng tạo hình với thép SS400 ở nhiệt độ cao, do đó ta có thể sử dụng phương pháp cho việc mô phỏng dự đoán hiện tượng đàn hồi lại cho các dạng chi tiết khác làm từ thép tấm SS400.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. S. J. H. Z. Marciniak, J.L. Ducan (2002), *Mechanics of Sheet Metal Forming*.
2. N. M. Đăng, 'Công nghệ tạo hình kim loại tấm'. NXB Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội, 2006.
3. F. STACHOWICZ, T. TRZEPIECIŃSKI, and T. PIEJA (2010), 'Warm forming of stainless steel sheet', *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 85-94.
4. D. T. Nguyen, J. G. Park, and Y. S. Kim (2016), 'A Study on Yield Function for Ti-6Al-4V Titanium Alloy Sheets at Elevated Temperatures', *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 69, no. 7, pp. 1343-1350.
5. C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli, and M. Simoncini (2006), 'Air bending of AZ31 magnesium alloy in warm and hot forming conditions', *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, no. 1-3, pp. 373-376.
6. A. Wang *et al* (2017), 'Springback analysis of AA5754 after hot stamping: experiments and FE modelling', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, no. 5-8, pp. 1339-1352.
7. N. Duc-Toan, Y. Seung-Han, J. Dong-Won, B. Tien-Long, and K. Young-Suk (2012), 'A study on material modeling to predict spring-back in V-bending of AZ31 magnesium alloy sheet at various temperatures', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, no. 5-8, pp. 551-562.
8. E. Voce (1948), 'The relationship between stress and strain for homogeneous deformation', *J Inst Met*.
9. C. O. Armstrong, P. J. and Frederick (1966), 'A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect', *G. E. G. B. Report*, vol. RD/B/N 731.
10. D. T. Nguyen (2014), 'A new constitutive model for AZ31B magnesium alloy sheet deformed at elevated temperatures and various strain rates', *High Temperature Materials and Processes*, vol. 33, no. 6, pp. 499-508.
11. V. Gia Hai, N. Thi Hong Minh, and D. T. Nguyen (2020), 'A study on experiment and simulation to predict the spring-back of SS400 steel sheet in large radius of V-bending process', *Materials Research Express*, vol. 7, no. 1, p. 016562.
12. G. Jis and G. Jis, 'JIS G3101 SS400 steel plate / sheet for general purpose structural steels', p. 86011881