



## XÁC ĐỊNH CÁC THAM SỐ VẬT LIỆU ĐỂ DỰ ĐOÁN ĐƯỜNG CONG BIẾN DẠNG CHO QUÁ TRÌNH KÉO/NÉN VẬT LIỆU TẮM DP590

Vương Gia Hải<sup>1,2</sup>, Nguyễn Thị Hồng Minh<sup>2</sup>, Nguyễn Đức Toàn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Trường Đại học Hải Phòng

<sup>2</sup> Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 03/04/2019

Ngày phân biên đánh giá và sửa chữa: 06/05/2019

Ngày bài báo được duyệt đăng: 20/05/2019

### Tóm tắt:

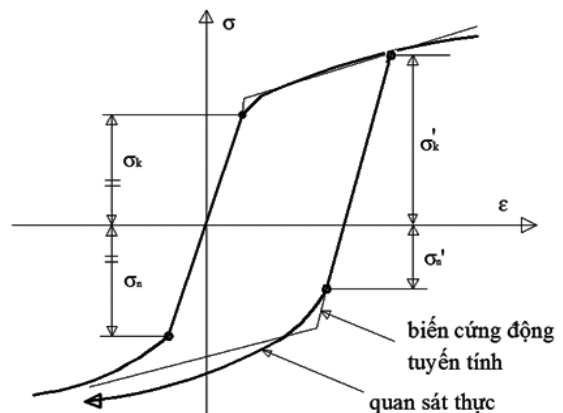
Trong bài báo này, đã đưa ra một phương pháp mới cho việc dự đoán chính xác đường cong chảy của vật liệu khi kéo/nén tấm kim loại có độ cứng cao DP590, phương pháp này là sự kết hợp mô hình vật liệu biến cứng đẳng hướng/động cho việc xác định các tham số vật liệu trước khi đưa vào quá trình mô phỏng bằng phần mềm phân tử hữu hạn ABAQUS/explicit 6.13. Trước tiên, các dữ liệu thực nghiệm của quá trình kéo/nén được thực hiện bằng máy kéo/nén đơn trục MTS 810. Hai mô hình vật liệu biến cứng đẳng hướng và biến cứng động đã được sử dụng để xác định các tham số vật liệu cho quá trình mô phỏng dựa vào dữ liệu thực nghiệm trước đó. Việc so sánh giữa các kết quả mô phỏng và thực nghiệm kéo/nén tấm kim loại DP590 đã cho thấy sự không phù hợp của hai mô hình trước đó. Cuối cùng, phương pháp mới để xác định tham số vật liệu cho quá trình kéo/nén tấm kim loại DP590 được đề xuất dựa trên mô hình vật liệu biến cứng đẳng hướng/động để cải thiện quá trình dự đoán đường cong biến dạng kéo/nén. Kết quả sau khi mô phỏng được so sánh với thực nghiệm và các mô hình vật liệu biến cứng đẳng hướng/động riêng rẽ đã cho thấy khả năng cải thiện độ chính xác một cách rõ ràng của mô hình kết hợp đã đề xuất.

**Từ khóa:** Thử nghiệm kéo/nén, mô hình vật liệu biến cứng, DP590, phân tử hữu hạn, ABAQUS.

### 1. Đặt vấn đề

Hiện nay, cùng với sự cạnh tranh của thị trường ngày càng lớn, xu hướng các sản phẩm tạo hình gia công biến dạng từ thép tấm ngày càng khó, với hình dạng tạo hình ngày càng phức tạp, nhiều cấu trúc thiết kế tự do, đòi hỏi độ chính xác cao và nhiều loại vật liệu mới với giới hạn bền kéo tối đa cao hơn và hệ quả các thuộc tính khả năng tạo hình thấp hơn [1]. Nhưng các sản phẩm này thường gặp một số vấn đề như: các vết nứt sớm, khả năng đàn hồi ngược cao, biến dạng quá mức của các bộ phận, chất lượng cuối cùng của bề mặt bị hỏng. Tất cả những thay đổi kể trên chính là tiền đề cần thiết cho quá trình mô phỏng số phát triển và trở thành một công cụ không thể thiếu cho việc dự đoán và tối ưu hóa các tham số đầu vào khác nhau như vật liệu, hình học, công nghệ [1-3]. Nhưng các kết quả phân tích mô phỏng số phải được kiểm chứng bằng việc so sánh với các kết quả thực nghiệm. Trong công nghệ tạo hình tấm kim loại thì hiện tượng ảnh hưởng Baushinger (Hình 1) của chu trình biến dạng dẻo là một yếu tố quan trọng đối với độ chính xác sau khi tạo hình của kim loại tấm. Hiệu ứng Baushinger được thể hiện thông qua sự khác biệt giữa giới hạn đàn hồi sau khi kéo ( $\sigma_k'$ ) rồi nén ( $\sigma_n'$ ) tấm kim loại so với giới hạn đàn hồi trong trường hợp kéo và nén một cách riêng biệt ( $\sigma_k = \sigma_n$ ). Bởi vì hiện tượng này sẽ gây ra các hiện tượng đàn hồi

ngược sau khi tạo hình biến dạng dẻo kim loại tấm.



Hình 1. Hiệu ứng Baushinger

Trong nghiên cứu này. Để dự đoán chính xác hiện tượng Baushinger trong quá trình kéo nén vật liệu tấm, mô hình cứng hóa đẳng hướng/động học đã được đề xuất đối với tấm kim loại DP590 đây là vật liệu thép cán nguội được dùng trong ngành điện, y tế, máy tính và trong ngành công nghiệp chế tạo khung vỏ ô tô. Trước tiên, các mẫu vật kéo DP590 được cắt từ tấm kim loại theo phương song song với hướng cán và tiến hành thực hiện các thí nghiệm kéo đơn trục. Để mô tả các dữ liệu thử nghiệm thông qua các phương trình liên tục của vật liệu, đường cong ứng suất biến dạng được cứng hóa theo luật Voce's

[4]. Các hằng số vật liệu của hàm chảy dẻo sau đó được xác định thông qua công cụ tính toán Maple 16 dựa trên các dữ liệu thí nghiệm và phương pháp tương thích bình phương bé nhất. Phần mềm phân tích phần tử hữu hạn ABAQUS cuối cùng được sử dụng mô tả quá trình kéo/nén tấm kim loại DP590, đưa ra dự đoán các đường cong ứng suất-biến dạng dựa trên các mô hình biến cứng vật liệu khác nhau và chứng minh rằng phương pháp đề xuất để xác định tham số vật liệu theo mô hình kết hợp động học/đẳng hướng cho kết quả là phù hợp hơn cả so với dữ liệu thí nghiệm.

**2. Mô hình vật liệu**

Luật cứng hóa của Voce [4] phương trình (1) biểu diễn đường cong ứng suất biến dạng như sau:

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

Với A và B là các hệ số dẻo.  $\bar{\sigma}$ ,  $\varepsilon_{eq}^{pl}$  và  $\sigma_Y$  là ứng suất tương đương, biến dạng tương đương, và giới hạn đàn hồi kéo, tương ứng.

Mô hình biến cứng kết hợp, được phát triển bởi Amstrong – Frederick [5] và sau đó Chaboche [6]. Đối với mô hình biến cứng kết hợp, các bề mặt dẻo Von-Mises vừa dịch chuyển (động học), vừa mở rộng (đẳng hướng) và định nghĩa là như trong phương trình. (2)

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

Trong đó  $\bar{\sigma}_{iso}$  là ứng suất chảy tương đương,  $\xi$  là tenxơ trạng thái ứng suất đo từ trung tâm của mặt dẻo, như thể hiện trong biểu thức (3) và  $\alpha$  là tenxơ ứng suất ngược.

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

Tenxơ trạng thái ứng suất lệch:

$$S_j = \sigma_j - \sigma_m I \quad (4)$$

Trong đó  $\sigma_j$ ,  $\sigma_m$  và I là ten xơ trạng thái ứng suất hiện hành, ten xơ trạng thái ứng suất trung bình và ten xơ trạng thái ứng suất đơn vị một cách tương ứng.

Đối với mô hình biến cứng đẳng hướng, phương trình (2) được viết lại theo phương trình (5).

$$f(\sigma) = \frac{1}{2} S_j : S_j = \frac{1}{3} \sigma^2 \quad (5)$$

Đối với mô hình biến cứng động học bề mặt dẻo được thể hiện qua phương trình (6).

$$\dot{f}(\sigma) = \frac{1}{2} \dot{\xi}_j : \dot{\xi}_j = 0 \quad (6)$$

Sự tiến triển theo mô hình biến cứng động học được mô tả thông qua lượng gia tăng ứng suất ngược theo hàm số của biến dạng dẻo tương đương.

$$d\alpha_j = \frac{C}{\bar{\sigma}} (\sigma_j - \alpha_j) d\varepsilon_{eq}^{pl} - \gamma \alpha_{ij} d\varepsilon_{eq}^{pl} \quad (7)$$

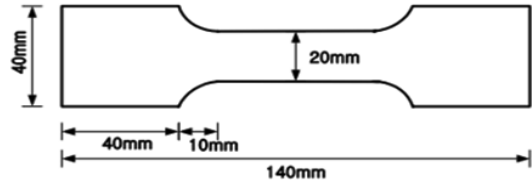
Trong đó ứng suất ngược  $\alpha$  được mô tả từ luật biến cứng động học theo phương trình hàm số mũ.

$$\alpha = \frac{C}{y} (1 - e^{-\gamma \varepsilon_{eq}^{pl}}) \quad (8)$$

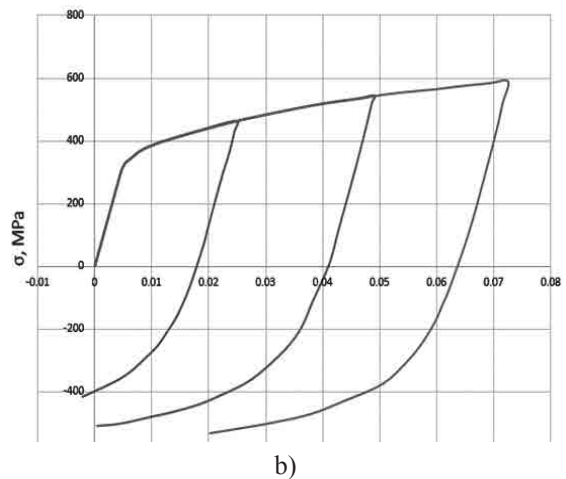
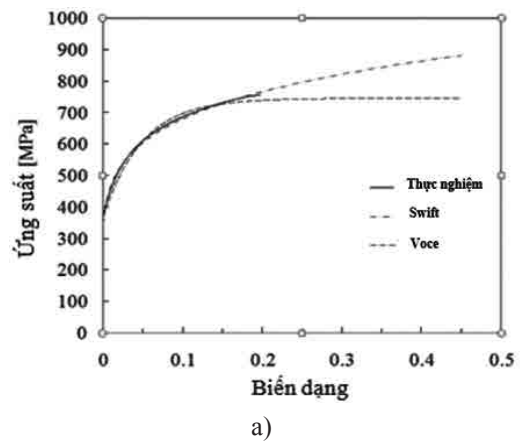
Với C và  $\gamma$  là các tham số của vật liệu cần được xác định theo luật biến cứng động học.

**2.1. Vật liệu**

Vật liệu sử dụng trong thí nghiệm là thép tấm có độ cứng cao DP590 có chiều dày 1.2 mm. Kích thước mẫu thử kéo/nén được cắt từ các tấm song song với hướng cán theo tiêu chuẩn như Hình 2. Các mẫu kéo/nén được cắt bằng máy cắt dây nhằm tránh sai lệch hình học. Hình 3 mô tả đường cong ứng suất-biến dạng khi kéo a) và kéo/nén tại các biến dạng khác nhau b) đối với vật liệu được phân tích DP590. Bảng 1 là thành phần hóa học của vật mẫu DP590. Tính chất cơ lý được thể hiện trong Bảng 2.



Hình 2. Kích thước tiêu chuẩn KS-13B của vật mẫu DP590 dày 1.2mm trong thử nghiệm kéo nén



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	Ni	0.02
Mn	1.59	Si	0.087	Sn	0.013	Fe	Còn lại

Bảng 2. Cơ tính của vật liệu mẫu DP590

Hệ số modul đàn hồi (GPa)	202
Giới hạn chảy (MPa)	358.7
Độ dẫn dài (%)	26.3
K	1027.8
n	0.184
R	0.754

## 2.2. Thiết lập thí nghiệm

Thí nghiệm kéo/nén đơn trục cũng được thực hiện bằng cách sử dụng máy kéo/nén đơn trục MTS 810. Để chống hiện tượng oằn khi nén phải sử dụng hệ thống kẹp hỗ trợ thủy lực. Khi đó nếu lực kẹp lớn hơn lực ma sát sẽ giảm được hiện tượng nếp nhăn và oằn của tấm kim loại. Để giảm tối đa các ảnh hưởng của ma sát, các tấm Teflon đã được sử dụng để bọc lên các tấm kẹp và lực kẹp được chuyển từ hệ thống bơm thủy lực tới các tấm kẹp thông qua một chuỗi các con lăn cho phép các tấm vật mẫu có thể di chuyển dọc theo chiều của lực kéo.

## 2.3. Xác định thông số vật liệu

### Mô hình biến cứng động học

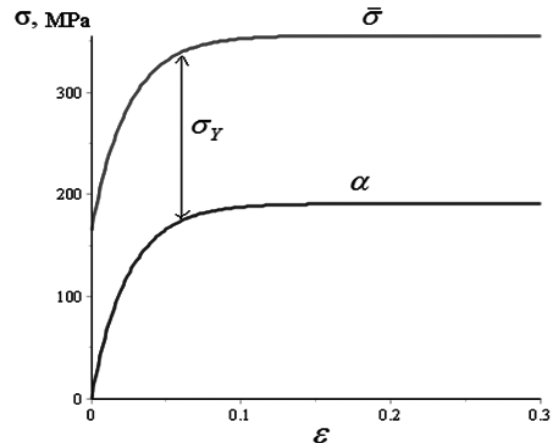
Để mô tả hiệu ứng Bauschinger trong quá trình dự đoán đường cong ứng suất biến dạng khi kéo nén tấm kim loại DP590, các thông số vật liệu của mô hình biến cứng động học C và  $\gamma$  trong phương trình (8) được xác định thông qua đường cong quan hệ giữa  $\alpha$  và  $\epsilon$ , trong đó dữ liệu  $\alpha$  được lấy bằng việc dịch chuyển đường cong ứng suất-biến dạng kéo một lượng bằng đúng giới hạn chảy ( $\sigma_y$ ) (Hình 4). Bảng công cụ tính toán Maple 16. Dùng phương pháp hồi quy phi tuyến ta có thể tìm được lần lượt C và  $\gamma$  là 6452.752 MPa và 18.583.

### Mô hình biến cứng đẳng hướng

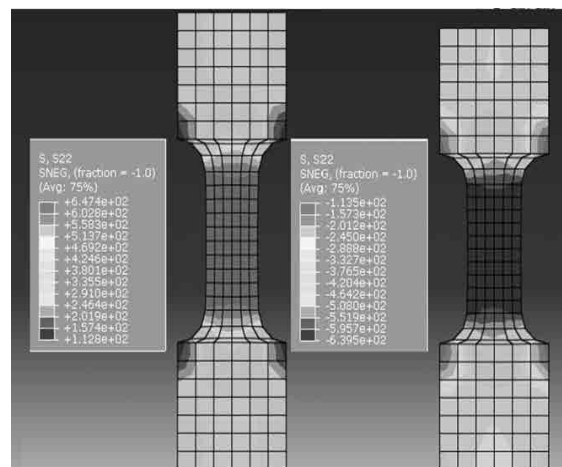
Trong trường hợp biến cứng đẳng hướng thuần túy, chỉ có tiến triển mở rộng kích thước của bề mặt chảy dẻo khi đó  $\alpha$  trong phương trình (8) là bằng không và phương trình (5) được sử dụng cho hàm chảy dẻo của vật liệu.

Khi mô hình biến cứng đẳng hướng được sử dụng để mô phỏng dự đoán đường cong ứng suất biến dạng trong quá trình kéo/nén đơn trục thì chỉ cần xác định các thông số  $\sigma_y$ , A, và B trong phương trình (1) như là các dữ liệu đầu vào cho quá trình mô phỏng. Bằng việc sử dụng phương trình (1) kết hợp với dữ liệu thí nghiệm trong Hình 3 và tận dụng

phương pháp bình phương bé nhất của phần mềm Maple 16 sẽ xác định được các giá trị tương ứng lần lượt của  $\sigma_y$ , A, và B là 358.70 (MPa), 347.23 (MPa) và 18.583.

Hình 4. Mô hình biến cứng động học để xác định  $\alpha$ 

## 3. Mô phỏng dự đoán đường cong kéo-nén

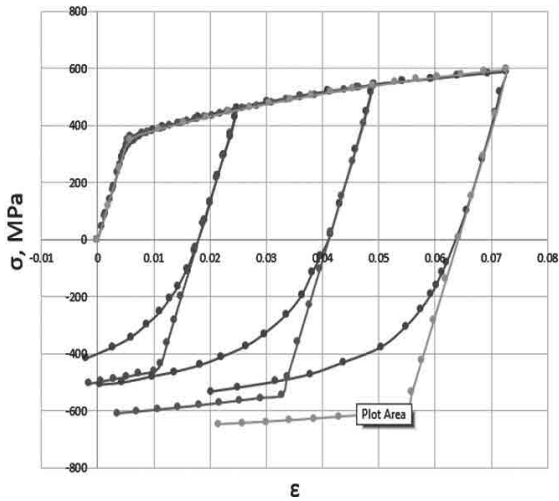


Hình 5. Kết quả mô phỏng FE cho kiểm tra kéo/nén

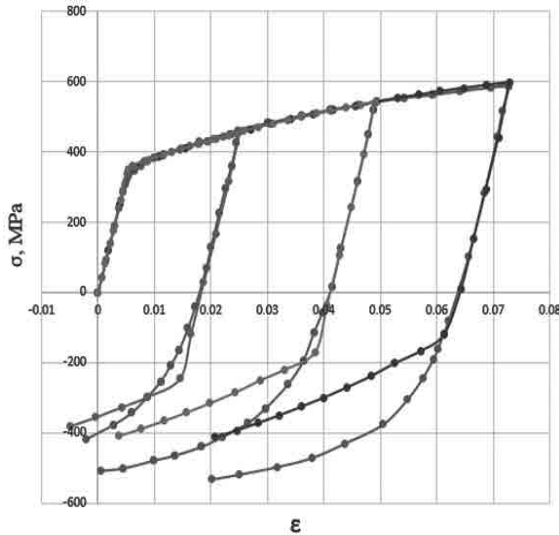
Để kiểm tra khả năng dự đoán đường cong ứng suất-biến dạng trong quá trình kéo và nén vật liệu tấm DP590 của các mô hình biến cứng khác nhau, các dữ liệu thu được từ kết quả thí nghiệm và tính toán trong phần 2.3 được lấy làm đầu vào cho quá trình mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn qua phần mềm (ABAQUS/Explicit). Ở đây, mô hình vật mẫu kiểm tra kéo/nén đơn trục được mô phỏng bằng các phần tử lưới dạng vỏ (S4R). Kết quả mô phỏng kéo/nén vật mẫu được thể hiện trong Hình 5.

Đối với mô hình biến cứng đẳng hướng các thông số đầu vào gồm có khối lượng riêng  $\rho$ , mô đun đàn hồi E của vật liệu và các tham số vật liệu  $\sigma_y$ , A, B đã xác định được từ phương trình (1) lần lượt

là 358.70 (MPa), 347.23 (MPa) và 18.583. . Đường cong ứng suất kéo-nén sau đó được dự đoán thông qua các phần tử lưới của mô hình và so sánh với dữ liệu thực nghiệm như trong Hình 6 (a). Đối với mô hình biến cứng động học ngoài các tham số đầu vào như mô hình biến cứng đẳng hướng còn phải đưa thêm vào các hệ số  $C, \gamma$  lần lượt là 6452.752 MPa và 18.583 để kể đến ảnh hưởng của hiệu ứng Bauschinger. Kết quả của việc dự đoán đường cong kéo nén khi sử dụng mô hình biến cứng đẳng hướng so với kết quả dữ liệu thực nghiệm được thể hiện trong Hình 6 (b).



a)



b)

Hình 6. Dự đoán cho những đường cong ứng suất biến dạng sử dụng mô hình biến cứng đẳng hướng (a) và biến cứng động học (b)

Từ kết quả mô phỏng dự đoán đường cong ứng suất kéo-nén sử dụng các mô hình biến cứng

động học khác nhau nhận xét thấy mô hình biến cứng đẳng hướng không đánh giá được hiệu ứng Bauschinger và kết quả là đường cong nén của mô hình dự đoán là lớn hơn so với dữ liệu thực nghiệm, còn mô hình biến cứng động học cho kết quả đánh giá được hiệu ứng Bauschinger nhưng giá trị lại thấp hơn so với dữ liệu thí nghiệm.

**4. Đề xuất xác định các tham số vật liệu bằng mô hình kết hợp**

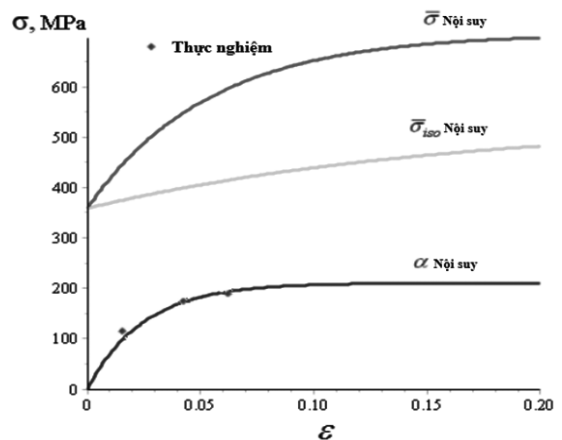
Từ kết quả mô phỏng ở phần 3 ta thấy, cả hai mô hình biến cứng động học và đẳng hướng đều không dự đoán chính xác được sự tiến triển của ứng suất-biến dạng trong quá trình kéo/nén vật liệu DP590. Do vậy nghiên cứu này đề xuất mô hình biến cứng kết hợp giữa động học và đẳng hướng để xác định các tham số của vật liệu. Khi đó, dữ liệu thử nghiệm trong quá trình kéo và nén đồng thời được sử dụng để xác định giá trị của  $(\alpha)$  phụ thuộc vào  $(\epsilon)$  như sau: tại mỗi vị trí biến dạng  $(\epsilon)$  cho trước sẽ tính toán điểm giá trị của  $(\alpha)$  tương ứng theo phương trình (9).

$$\alpha_i = \frac{\bar{\sigma}_{i(kéo)} + \bar{\sigma}_{i(nén)}}{2} \tag{9}$$

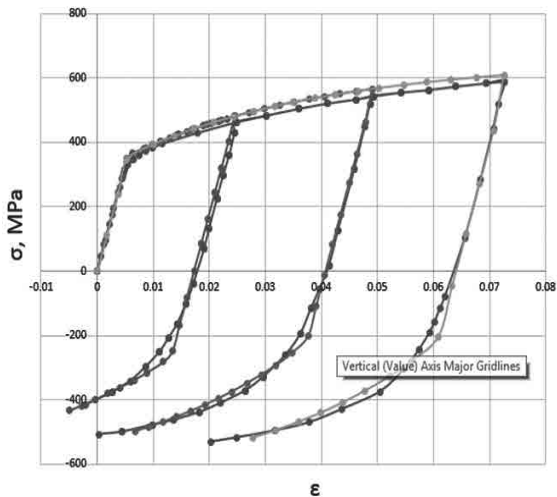
Trong đó:  $\bar{\sigma}_{i(kéo)}$  và  $\bar{\sigma}_{i(nén)}$  tương ứng là các giá trị ứng suất trong trạng thái kéo và nén tại một vị trí biến dạng bất kỳ.

Từ dữ liệu xác định của  $\alpha$  phụ thuộc vào  $(\epsilon)$  theo phương trình (9) và tận dụng phương pháp hồi quy phi tuyến của công cụ tính toán Maple 16 để xác định các tham số vật liệu  $C1$  và  $\gamma1$  theo công thức (8) tương ứng là 8472,625 MPa và 40.25 khi đó phương trình hàm chảy dẻo tương đương theo giá trị biến dạng tương đương phải được tính toán lại bằng phương trình (10) và Hình 7.

$$\bar{\sigma}_{iso}(\epsilon_{eq}^{pl}) = \bar{\sigma}(\epsilon_{eq}^{pl}) - \alpha(\epsilon_{eq}^{pl}) \tag{10}$$



Hình 7. Các thông số xác định biến cứng kết hợp dựa trên dữ liệu thực nghiệm



Hình 8. Dự đoán cho những đường cong ứng suất biến dạng khi kéo/nén bằng mô hình biến cứng kết hợp đẳng hướng/động học

Những dữ liệu từ phương trình chảy dẻo tương đương này sẽ được sử dụng để xác định các thông số biến cứng mới A1 và B1 theo phương trình (11) bằng công cụ tính toán Maple 16 tương ứng là

173.124 Mpa và 6.255. Các dữ liệu của tham số vật liệu mới A1, B1, C1 và  $\gamma_1$  sẽ được đưa vào quá trình mô phỏng để dự đoán đường cong ứng suất- biến dạng trong quá trình kéo nén tấm kim loại DP590 như trong Hình 8. So sánh kết quả dự đoán của mô hình biến cứng kết hợp giữa động học và đẳng hướng Hình 8 được đề xuất trong nghiên cứu này với các mô hình trước đó Hình 6 (a, b) để thấy khả năng dự đoán chính xác đường cong ứng suất-biến dạng trong quá trình kéo nén vật liệu tấm DP590.

$$\bar{\sigma}_{iso} = \sigma_Y + A_1 (1 - \exp(-B_1 \epsilon_{eq}^{pl})) \quad (11)$$

#### 4. Kết luận

Bài báo đã đưa ra một phương pháp mới để xác định các tham số vật liệu cho việc dự đoán chính xác hiệu ứng Bauschinger, mô hình biến cứng kết hợp giữa động học và đẳng hướng để xác định các tham số của vật liệu. Đây sẽ là tiền đề để áp dụng và dự đoán chính xác hiện tượng đàn hồi ngược sau khi tạo hình biến dạng dẻo tấm DP590 trong quá trình gia công tạo hình các chi tiết phức tạp, đặc biệt là bù và tối ưu hóa kích thước chày và cối khi tạo hình các sản phẩm có hình dạng chữ U hoặc V từ thép tấm DP590 trong các nghiên cứu tiếp theo.

#### Tài liệu tham khảo

- [1]. Nguyen Duc-Toan, Kim Young-Suk, Jung Dong-Won, "Coupled Thermo-Mechanical FE Study to Improve Press Formability of a Camera shape for Magnesium Alloy Sheet AZ31B". *Metals and Materials International*, 2012, **18(4)**, pp. 583–595.
- [2]. Nguyễn Đức Toàn, Phạm Quốc Tuấn, Nguyễn Đình Thành, "Nâng cao chất lượng tạo hình uốn ống đồng sử dụng phân tích, mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn," *Tạp chí khoa học và công nghệ*, 2014, **98**, tr. 29-33.
- [3]. Nguyen Duc-Toan, Banh Tien-Long, "NUMERICAL ANALYSIS TO DETERMINE DIE RADIUS AND BENDING ANGLE IN ROLL-BENDING PROCESS FOR SHEET MATERIAL, JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY," 2012, **88**, pp. 84-89.
- [4]. E. Voce, *J Inst Met* 74, 1978, pp. 537-562.
- [5]. P.J. Armstrong, C.O. Frederick, "A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect," *G.E.G.B. Report RD/B/N 731*, 1966.
- [6]. J.L. Chaboche, "Time independent constitutive theories for cyclic plasticity". *Int J Plast.* 2, 1986, pp. 149-188.

### A STUDY ON DETERMINING MATERIAL PARAMETERS TO PREDICT STRESS-STRAIN CURVES FOR TENSION/COMPRESSION TENSILE TEST OF DP590 SHEET MATERIAL

#### Abstract:

*This paper presents the predict more correctly stress-strain curves during tension/compression testing of high strength steel DP590 sheet material, the isotropic and kinematic hardening models were combined by the new way in order to determine the material parameters before inputting to FEM simulation software, namely ABAQUS/explicit 6.13. The tension/compression tensile test was first performed by using MTS 810*

*tensile test machine. The isotropic and kinematic hardening models were then used to determine material parameters for FEM simulation utilizing experimental data. After that, the comparison between tension/compression experiment and simulation results of DP590 sheet material were depicted to show the big gap of previous models. Finally, the new method to obtain the new material parameters of tension/compression test for DP590 sheet material were proposed based on the combined isotropic/kinematic hardening model in order to improve the quality of prediction during tension/compression test. The final simulation results were also compared with experiments, isotropic/ kinematic hardening models seperately and proved the good prediction of proposed model.*

**Keywords:** *Tension/compression test, Hardening models of material, DP590, FEM, ABAQUS.*