

## NGHIÊN CỨU TÍNH ĐÀN HỒI TẤM THÉP DƯỚI TÁC DỤNG NHIỆT

### STUDY ON THE ELASTICITY OF STEEL SHEETS UNDER HEAT

**Trần Văn Mạnh**

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

#### TÓM TẮT

*Nghiên cứu này trình bày một phương pháp để dự đoán chính xác xu hướng đàn hồi khi uốn tấm thép dưới nhiệt độ cao. Nghiên cứu tận dụng dữ liệu thử nghiệm độ bền kéo mở rộng để xác định các tham số cho định luật độ cứng động học và đẳng hướng thuần túy ở các nhiệt độ khác nhau. Mặc dù chỉ sử dụng các định luật làm cứng đẳng hướng hoặc động học thuần túy cũng có những hạn chế, đặc biệt là ở nhiệt độ cao. Để giải quyết vấn đề này, tác giả sử dụng tỷ lệ đường cong ứng suất dòng chảy giữa nhiệt độ cao và nhiệt độ phòng như một hàm của các tham số biến dạng tương đương để rút ra định luật làm cứng kết hợp.*

**Từ khóa:** Định luật làm cứng; FEM; Đàn hồi ngược; Mô hình dự đoán.

#### ABSTRACT

*This study presents a method to accurately predict the elastic trend when bending steel plates under high temperature. The study takes advantage of extensive tensile test data to determine the parameters for the pure isotropic and kinematic stiffness laws at different temperatures. Although using only isotropic or purely kinematic hardening laws has its limitations, especially at high temperatures. To solve this problem, the author uses the flow stress curve ratio between high temperature and room temperature as a function of equivalent deformation parameters to derive the combined hardening law.*

**Keywords:** Hardening law; FEM; Reverse elastic; Prediction model.

#### 1. GIỚI THIỆU

Mô phỏng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) đã được chứng minh là một công cụ có giá trị trong việc dự đoán độ đàn hồi trong các quá trình tạo hình kim loại. Các nhà nghiên

cứu [1-3] đã đề xuất nhiều phương pháp khác nhau để dự đoán khả năng tạo hình và giảm độ đàn hồi, bao gồm kết hợp dữ liệu thử nghiệm uốn với kết quả FEM, thay đổi hình dạng của dụng cụ, tối ưu hóa kích thước tấm và sử dụng mô phỏng FEM linh hoạt.

Thép tạo hình kim loại được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp khác nhau, hiện tượng đàn hồi ngược ảnh hưởng lớn đến độ chính xác cuối cùng của sản phẩm trong quá trình uốn và bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như bán kính uốn, vật liệu, độ dày, tốc độ uốn và nhiệt độ gia nhiệt [4]. Nhiệt độ làm nóng có ảnh hưởng đặc biệt đến việc ảnh hưởng đến độ đàn hồi. Nhiều nghiên cứu [5] đã chỉ ra rằng nhiệt độ cao làm giảm độ đàn hồi trở lại.

Nghiên cứu này để xác định các thông số độ cứng trong tấm thép uốn ở nhiệt độ cao, dựa trên công thức ứng suất ngược tương quan với tỷ lệ ứng suất dòng chảy giữa nhiệt độ cao và nhiệt độ phòng.

## 2. MÔ HÌNH VẬT LIỆU VÀ ĐỘ CỨNG

Để áp dụng trong mô phỏng FEM, các tham số độ cứng của định luật độ cứng đẳng hướng và định luật làm cứng động học được mô tả bằng sự gia tăng ứng suất ngược ( $\alpha$ ) là một hàm của biến dạng dẻo tương đương:

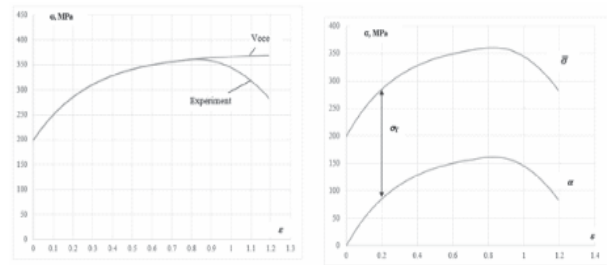
$$\bar{\sigma} = \sigma_Y + A(1 - \exp(-B\varepsilon_{eq}^{pl})) \quad (1)$$

Trong đó,  $\sigma_Y$  là cường độ chảy; A và B là các thông số độ cứng,  $\bar{\sigma}$  là ứng suất tương đương và  $\varepsilon_{eq}^{pl}$  là chủng tương đương.

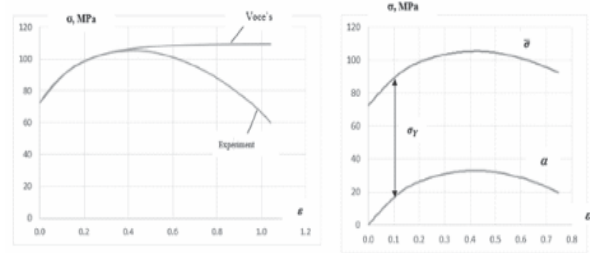
$$\alpha = \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma\varepsilon_{eq}^{pl}}) \quad (2)$$

Trong đó, C và  $\gamma$  là các tham số vật liệu mô tả hành vi động.

Quy trình thực hiện và các tham số thu được lần lượt được thể hiện trong Hình 2 và Bảng 1. Các thông số vật liệu này sẽ được sử dụng làm dữ liệu đầu vào trong mô phỏng FEM được thực hiện bằng phần mềm Abaqus.



(a) 300°C



(b) 600°C

Hình 1. Đường cong ứng suất và ứng suất ngược dựa trên các định luật làm cứng động học đối với (a) Nhiệt độ 300°C và (b) 600°C.

Trong nghiên cứu này, vật liệu thép tấm SS400, theo tiêu chuẩn JISG 3101 [37], được sử dụng để thử kéo.

Bảng 1. Thành phần hóa học của thép tấm SS400

| C         | Si        | Mn      | P    | S    | Cr   |
|-----------|-----------|---------|------|------|------|
| 0,19-0,21 | 0,05-0,17 | 0,4-0,6 | 0,04 | 0,05 | 30,3 |

## 3. THÍ NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG UỐN THÉP Ở NHIỆT ĐỘ CAO

### 3.1. Quy trình mô phỏng

Để dự đoán độ đàn hồi sau khi uốn chữ V của tấm thép SS400, cả định luật làm cứng đẳng hướng và động học thuần túy đều được sử dụng bằng phần mềm ABAQUS. Các tham số đầu vào cho mô phỏng được trình bày trong Bảng 2. Độ lệch của góc đo ( $\Delta\theta$ ) sau khi đàn hồi ngược được tính:



$$\Delta\theta = \theta_{\text{sim}} - \theta_{\text{exp}} \quad (3)$$

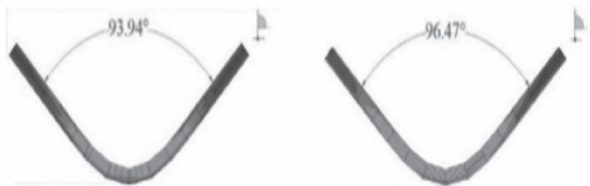
Trong đó,  $\theta_{\text{sim}}$  và  $\theta_{\text{exp}}$  lần lượt là các góc đo mô phỏng và thử nghiệm.



(a) Đẳng hướng động học



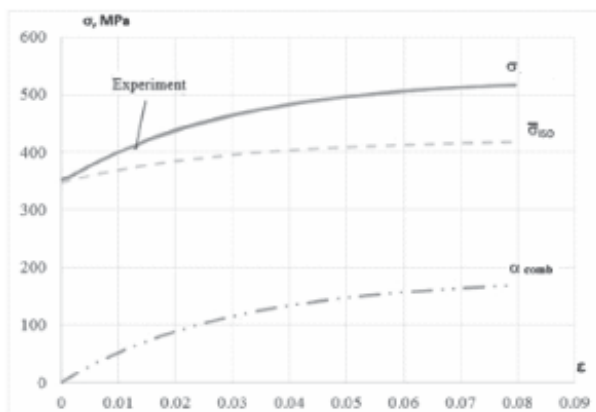
(b) Đẳng hướng động học



(c) Đẳng hướng động học

Hình 2. Kết quả mô phỏng với các chuyển vị dọc chày khác nhau

### 3.2. Định luật làm cứng kết hợp



Hình 3. Thiết lập các thông số của định luật tăng cứng kết hợp ở nhiệt độ phòng

Dự đoán đàn hồi ngược sử dụng định luật làm cứng đẳng hướng thuần túy lớn hơn thí nghiệm tương ứng khoảng  $1,6^\circ$ , trong khi dự đoán sử dụng định luật làm cứng động học thuần túy nhỏ hơn thí nghiệm tương ứng khoảng  $2,8^\circ$ . Một mô hình mới đã được đề xuất bằng cách kết hợp các định luật làm cứng đẳng hướng và động học như trong phương trình:

$$\bar{\sigma} = \sigma_Y + A_1(1 - \exp(-B_1 \varepsilon_{eq}^{pl})) + \frac{C_1}{\gamma_1}(1 - e^{-\gamma_1 \varepsilon_{eq}^{pl}}) \quad (4)$$

$$\alpha_{comb} = \left( \frac{\Delta\alpha_{iso}}{\Delta\alpha_{iso} - \alpha_{kine}} \right) \times \alpha = 0,583 \times \alpha \quad (5)$$

Mối quan hệ giữa ứng suất lưng mới ( $\alpha_{comb}$ ) và biến dạng tương đương ( $\varepsilon_{eq}^{pl}$ ) được sử dụng để xác định các tham số của định luật độ cứng mới được đề xuất  $C_1$  và  $\gamma_1$  sử dụng phần mềm tính toán Excel 2013 theo phương pháp bình phương bé nhất.

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

Kết quả mô phỏng uốn chữ V thực hiện trên tấm thép SS400 sử dụng định luật độ cứng tổng hợp được đề xuất được mô tả ở trên và chứng minh rằng định luật độ cứng tổng hợp được đề xuất có độ chính xác cao hơn trong việc dự đoán đàn hồi trong uốn chữ V so với các định luật làm cứng đẳng hướng và động học thuần túy. Độ lệch tối đa giữa kết quả mô phỏng và kết quả thử nghiệm đối với góc đàn hồi ngược được tìm thấy là  $0,668^\circ$ .

Bảng 2. So sánh kết quả uốn chữ V trước và sau khi đàn hồi ở nhiệt độ cao 300°C và 600°C

| H (mm) | Góc uốn<br>(°) | Đo góc (°) |        |       |               |          |        |       |               |
|--------|----------------|------------|--------|-------|---------------|----------|--------|-------|---------------|
|        |                | 300°C      |        |       |               | 600°C    |        |       |               |
|        |                | Mức độ     |        |       | Trung<br>bình | Mức độ   |        |       | Trung<br>bình |
|        |                | Đầu tiên   | 2      | 3     |               | Đầu tiên | 2      | 3     |               |
| 10     | 136            | 139,1      | 140,15 | 138,9 | 139,38        | 137      | 137,45 | 137,2 | 137,22        |
| 16     | 112            | 116,2      | 115,5  | 115,2 | 115,63        | 113,15   | 114    | 113,5 | 113,55        |
| 22     | 88             | 93,5       | 93,0   | 93,0  | 93,167        | 90,5     | 90     | 90    | 90,167        |

Để mô phỏng hiện tượng đàn hồi ngược ở nhiệt độ cao, nghiên cứu này sử dụng định luật làm cứng được đề xuất ở nhiệt độ phòng kết hợp với việc xác định hàm ứng suất ngược ở nhiệt độ cao.

Bảng 3. Các thông số độ cứng của định luật độ cứng tổng hợp ở nhiệt độ cao.

| Nhiệt độ (°C) | $\sigma_y$ (MPa) | $A_1$ (MPa) | $B_1$  | $C_1$ (Mpa) | $\gamma_{\text{Đầu tiên}}$ |
|---------------|------------------|-------------|--------|-------------|----------------------------|
| 300           | 199,3            | 53,3422     | 6,9049 | 280,9023    | 2,0133                     |
| 600           | 72,43            | 29,2536     | 6,3814 | 36,5690     | 4,7288                     |

4. KẾT LUẬN

Phương pháp này đã được chứng minh thông qua phân tích so sánh nghiêm ngặt, bao gồm phân tích phần tử hữu hạn bằng phần mềm ABAQUS và kết quả thử nghiệm thu được từ các thử nghiệm uốn.

Đã đề xuất là một công cụ mạnh mẽ để mô phỏng các dự đoán đàn hồi qua các quá trình uốn khác nhau liên quan đến các tấm thép ở nhiệt độ cao.

Các kết quả có thể áp dụng cho việc tối ưu hóa quy trình uốn trong các ứng dụng công nghiệp thực tế, trong đó dự đoán độ đàn hồi chính xác có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất quy trình và chất lượng sản phẩm, đánh dấu sự đóng góp khác biệt và sáng tạo cho lĩnh vực này.❖

Ngày nhận bài: 26/4/2024  
Ngày phản biện: 30/5/2024

Tài liệu tham khảo:

[1]. S. Nishino, K. Ohya, and K. Naruishi (2003), “Proposal for reducing press working load and highly accurate evaluation of springback error in bending automobile sheet metal”, JSAE Review, vol. 24, no. 3, pp. 283-288.

[2]. I. N. Chou and C. Hung (1999), “Finite element analysis and optimization on springback reduction”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 39, no. 3, pp. 517-536.

[3]. A. P. Karafillis and M. C. Boyce (1992), “Tooling design in sheet metal forming using springback calculations”, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 34, no. 2, pp. 113-131.

[4]. G. M. S. Ahmed, H. Ahmed, M. V. Mohiuddin, and S. M. S. Sajid, “Experimental Evaluation of Springback in Mild Steel and its Validation Using LS-DYNA”, Procedia Materials Science, vol. 6, no. Icmpc, pp. 1376-1385, 2014.

[5]. F. Yoshida and T. Uemori (2002), “A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and work hardening stagnation”, International Journal of Plasticity, vol. 18, no. 5-6, pp. 661-686.