

Nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số ứng xử biến cứng của thép 316L

Lương Việt Dũng*

Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên.

*Email: luongvietdung@tnut.edu.vn

Nhận bài: 02/9/2023; Hoàn thiện: 07/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.190-196>

TÓM TẮT

Biến cứng là một tham số rất quan trọng để đánh giá hành vi đàn dẻo của vật liệu, đặc biệt là khi mô phỏng số các ứng xử cơ học của vật liệu. Trong nghiên cứu này, các thí nghiệm kéo-nén theo chu kỳ đối với mẫu thép 316L được thực hiện để xác định các tham số biến cứng cho các mô hình như mô hình biến cứng đẳng hướng tuyến tính, biến cứng động học tuyến tính, biến cứng đẳng hướng phi tuyến, biến cứng động học phi tuyến và mô hình Chaboche. Qua đó, đánh giá được những ưu điểm và nhược điểm của từng mô hình. Cuối cùng, ứng xử theo mô hình Chaboche được lựa chọn để đề xuất xây dựng một thuật toán cho mô phỏng số thí nghiệm kéo-nén tuần hoàn. Các kết quả số thu được là phù hợp tốt với kết quả thực nghiệm.

Từ khoá: Biến cứng; Thép Austenitic; Ứng xử tuần hoàn; Mô phỏng; Phân tử hữu hạn.

1. MỞ ĐẦU

Trong thiết kế và phát triển các sản phẩm kỹ thuật từ đơn giản đến phức tạp, đòi hỏi phải kiểm soát rất nhiều các đặc tính vật liệu sử dụng trong các bước mô hình hóa và mô phỏng số. Thép không gỉ austenit đã được sử dụng rộng rãi vì độ bền, độ dẻo và khả năng chống ăn mòn tuyệt vời ở môi trường nhiệt độ cao. Một số nhà nghiên cứu đã quan tâm đến hành vi mỏi và tuần hoàn của nó dưới các loại tải trọng khác nhau [1–9]. Ảnh hưởng của biến dạng cứng lên quá trình kết tủa của hợp kim AA6111 nhằm thiết lập vai trò của nó đối với các đặc tính gia cố được đánh giá bởi Quainoo et al [1]. Thí nghiệm được tiến hành dưới các ứng suất bán tĩnh hoặc thay đổi với biên độ không đổi. Kết quả cho thấy sự cải thiện đáng kể về giới hạn dẻo và độ bền kéo với sự gia tăng mức độ biến dạng trước. Các kết quả thu được cho phép xác định các đặc tính cơ học tĩnh khi kéo và nén của các trạng thái được nghiên cứu và thiết lập các đường cong biến dạng cứng đơn điệu và theo chu kỳ của chúng. Biên độ của ứng suất là một hàm tuyến tính của biến dạng dẻo theo thang logarit, cho phép mô hình hóa đơn giản quy luật làm cứng tuần hoàn của vật liệu nghiên cứu. Nghiên cứu về cơ chế làm cứng vật liệu là rất quan trọng để phát triển các mô hình dự đoán tuổi thọ và đánh giá độ tin cậy của kết cấu [2]. Trong trường hợp tải trọng mỏi oligocyclic không tỷ lệ, các phương pháp gần đúng có thể được sử dụng để xác định mức độ cứng biến dạng tối đa từ việc phân tích các đường cong biến dạng của vật liệu kim loại [3]. Hiện nay, có nhiều mô hình biến cứng khác nhau và mỗi mô hình có ưu nhược điểm riêng. Do đó cần thiết phải có một đánh giá chung cho các mô hình này.

Mục tiêu của nghiên cứu này là xác định các tham số khác nhau trong một số mô hình biến cứng. Từ đó đưa ra các đánh giá ưu điểm và nhược điểm của từng mô hình ứng xử. Cuối cùng, một thuật toán mô phỏng ứng xử kéo nén theo chu kỳ cho mẫu thép 316L được đề xuất. Kết quả số thu được phù hợp với kết quả thực nghiệm.

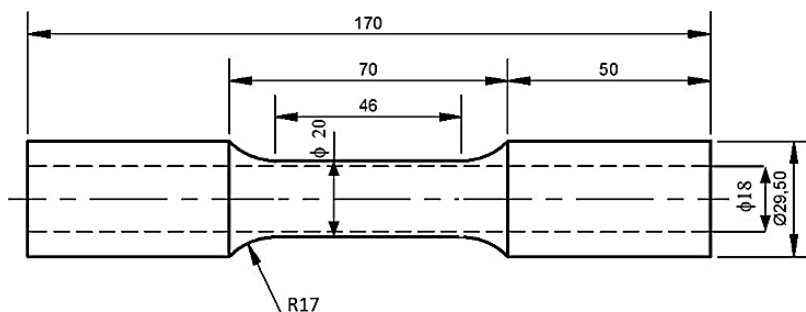
2. VẬT LIỆU NGHIÊN CỨU VÀ THỰC NGHIỆM

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này là thép 316L với thành phần hóa học như trong bảng 1. Các thử nghiệm cơ học được thực hiện trên các mẫu hình trụ hình ống như trong hình 1.

Các thử nghiệm kéo-nén được thực hiện trên máy thủy lực trợ lực hướng trục-xoắn MTS 809 với công suất ± 250 KN/ ± 75 mm ở nhiệt độ phòng và tần số 1 Hz.

Bảng 1. Thành phần hóa học theo phần trăm khối lượng của thép 316L.

C	Mn	Ni	Cr	Mo	S	Si	P
0.035	2	15	18	3	0.03	1	0.045

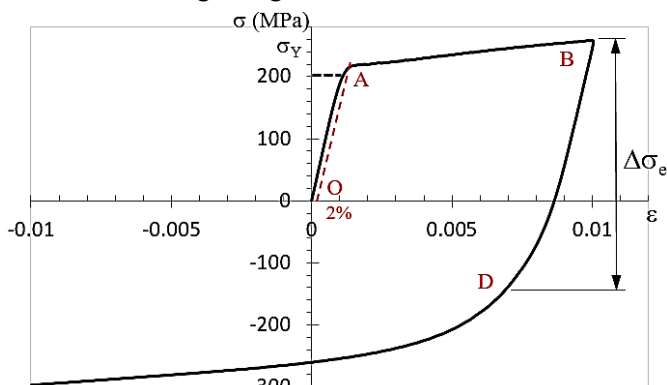


Hình 1. Kích thước của mẫu thí nghiệm.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc tính cơ học trong quá trình kéo-nén đơn

Hiện tượng đàn dẻo quan sát được trong chu kỳ tải đầu tiên được biểu diễn như trong hình 2. Dễ dàng nhận thấy đoạn OA là đường thẳng và tính được $E = 198019 \text{ MPa}$, $\sigma_y = 200 \text{ MPa}$.

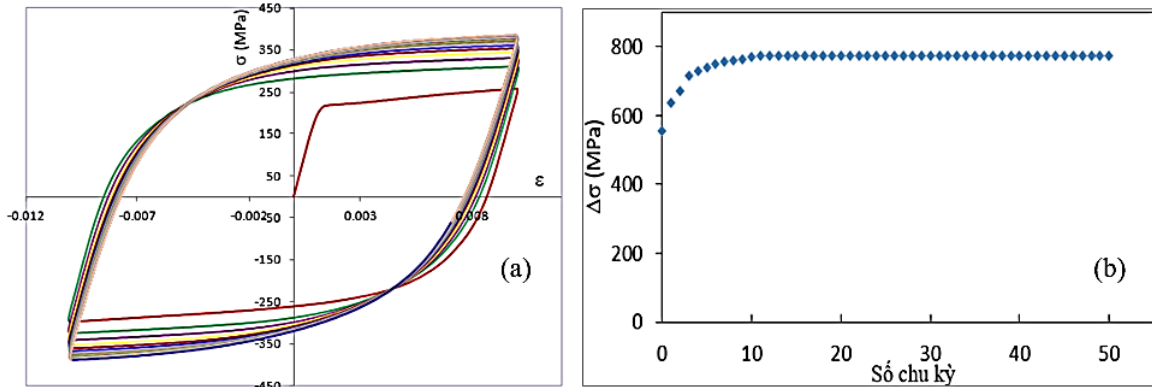


Hình 2. Chu kỳ đặt tải-dỡ tải đầu tiên.

Vùng AB là vùng dẻo. Trong vùng này, biến dạng không còn tỷ lệ thuận với ứng suất. Vùng BD, quan sát thấy biến dạng dẻo (ϵ_{11}^p) không đổi trong khi ứng suất và biến dạng đàn hồi (ϵ_{11}^e) thay đổi. Nó đòi hỏi phải xử lý dần dần các quy luật ứng xử trong tính dẻo. Ngoài D, cần lưu ý rằng: biến dạng dẻo lại phát triển; sự không liên tục của độ dẻo của mác dốc khi đảo ngược tải trọng; giới hạn đàn hồi mới $\Delta\sigma_e \neq 2\sigma_y$, đây là hiện tượng biến cứng đẳng hướng. Điểm B và D không đối xứng qua trục ứng suất. Đó là hiệu ứng Bauschinger.

3.2. Đặc tính cơ học tuần hoàn

Sau khi thực hiện thí nghiệm kéo-nén theo chu kỳ, các đường cong theo chu kỳ thu được, được biểu diễn như trên hình 3a. Từ đường cong này, các tham số mô tả quá trình biến cứng của thép 316L sẽ được xác định. Tải tác dụng theo chu kỳ gây ra sự tăng biên độ của ứng suất trong các chu kỳ. Biên độ của ứng suất so với một số chu kỳ được thể hiện như trong hình 3b. Đường cong này cho thấy thép 316L có độ cứng theo chu kỳ là đáng kể. Hai giai đoạn củng cố theo chu kỳ được phân biệt: Giai đoạn xảy ra nhanh của biên độ ứng suất (*trong sáu chu kỳ đầu tiên*) và giai đoạn bão hòa trong đó biên độ ứng suất không đổi hoặc gần như không đổi (*trong các chu kỳ tiếp theo*).



Hình 3. (a) Đường cong ứng suất-biến dạng theo chu kỳ;
(b) Sự phát triển của biên độ ứng suất so với số chu kỳ.

3.3. Kết quả mô phỏng và bình luận

3.3.1. Mô hình đẳng hướng tuyến tính

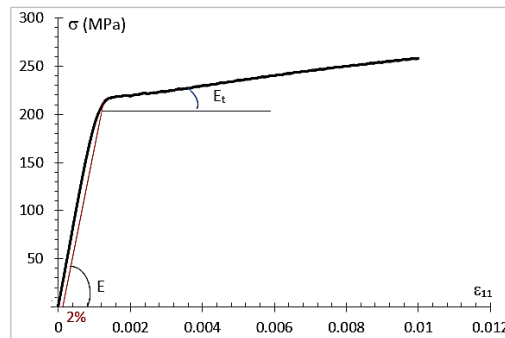
Từ các kết quả thử nghiệm, đường cong của chu kỳ đầu tiên tại $\epsilon = 0$ và tại $\epsilon = 0,01$ được vẽ như trong hình 4. Luật ứng xử này dễ dàng xác định được bằng cách sử dụng mô hình tuyến tính đặc trưng bởi:

$$dR = h.dp \text{ và } \sigma_y = \sigma + hp \rightarrow h = \frac{\sigma_y - \sigma}{p} \quad (1)$$

Trong đó: h là mô đun biến cứng của vật liệu ; p là biến dạng dẻo tích lũy (bằng ϵ_p trong trường hợp một vòng); σ_y là giới hạn đàn hồi. Mô đun biến cứng h của vật liệu được tính theo công thức:

$$h = \frac{E.E_t}{E - E_t} \Rightarrow h = 6737 \text{ MPa}$$

Trong đó: E là mô đun đàn hồi (mô đun Young); E_t là mô đun dẻo (mô đun tiếp tuyến).



Hình 4. Mô hình biến cứng đẳng hướng tuyến tính.

Ưu điểm của mô hình: ứng suất thay đổi tuyến tính với biến dạng dẻo, giới hạn đàn hồi được phân cấp và miền đàn hồi không đổi; sự thay đổi của ứng suất theo hàm biến dạng tuân theo quy luật tuyến tính đối với trường hợp chất tải hoặc đỡ tải; đồ thị đàn hồi luôn có độ dốc bằng mô đun Young và độ dẻo có độ dốc bằng mô đun tiếp tuyến.

3.3.2 Mô hình biến cứng tuyến tính

Các luật ứng xử đàn dẻo với quá trình biến cứng động học tuyến tính được điều chỉnh cho phù hợp với các mô hình hóa. Luật biến cứng động học tuyến tính được giải thích dưới dạng:

$$dX_{ij} = \frac{2}{3}hd\varepsilon_{ij}^p \text{ and } C_c = \frac{2}{3}h \quad (2)$$

Với C_c là hằng số động học và có giá trị: $C_c = 4491,33MPa$.

3.3.3. Mô hình biến cứng đẳng hướng phi tuyến tính

Miền dẻo là đường cong có độ dốc giảm dần. Sự phát triển của R như một hàm tích lũy của p trong quá trình biến cứng dần dần. Đối với các hiệu ứng theo chu kỳ, sự phát triển này tăng dần. Sự phát triển của R có thể được cụ thể hóa bằng phương trình sau:

$$dR = b(Q - R)dp \quad (3)$$

Trong đó, Q là hằng số cho giá trị tiệm cận tương ứng với chế độ tuần hoàn ổn định, b là hằng số biểu thị tốc độ ổn định. Q được xác định theo công thức sau:

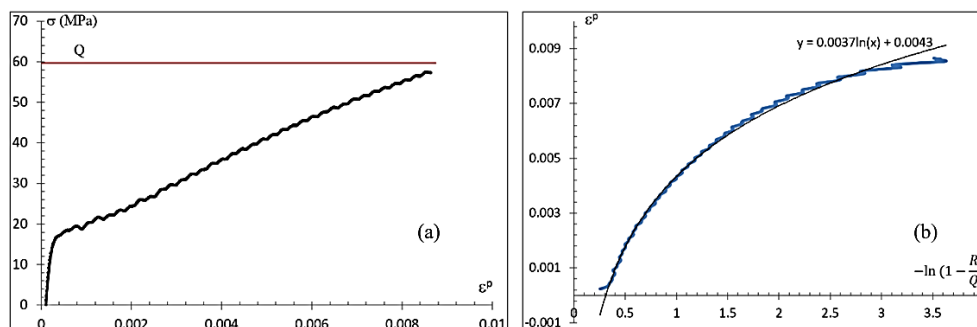
$$R = \sigma - \sigma_y = Q(1 - \exp(-bp)) \quad (4)$$

Khi P dần tiến tới $+\infty$ thì $(\sigma_{11} - \sigma_y)$ tiến tới Q. Bằng cách vẽ đồ thị tiệm cận ngang với đường cong của chu kỳ ổn định, ta có thể đo được $Q = 60 MPa$ (hình 5a)

Từ (4), ta có: $R = \sigma - \sigma_y = Q(1 - \exp(-bp)) = Q\left(1 - \exp(-b\varepsilon^p)\right) \rightarrow \varepsilon^p = \frac{1}{b}\left(-\ln\left(1 - \frac{R}{Q}\right)\right)$.

Từ đồ thị (hình 5b), xác định được giá trị $b = 333,3$.

Ưu điểm của mô hình: ở một số chu kỳ nhất định ta có thể nhận thấy sự tuyến tính của hai phần đàn hồi và dẻo. Nhược điểm: Mô hình này không thể hiện tốt hơn hành vi thực tế của vật liệu.



Hình 5. Đường cong cho (a) xác định Q, (b) xác định b.

3.3.4. Mô hình biến cứng động học phi tuyến tính

Luật biến cứng động học phi tuyến tính được giải thích dưới dạng:

$$dX_{ij} = \frac{2}{3}hd\varepsilon_{ij}^p - \gamma X_{ij}dp \quad (5)$$

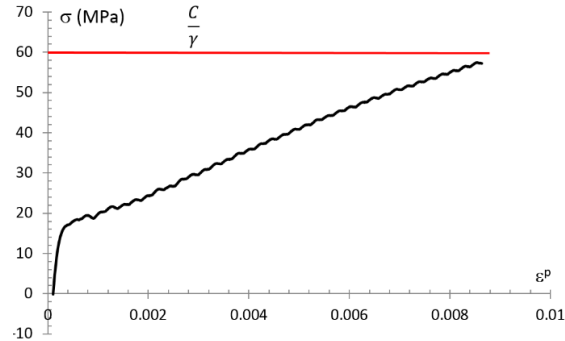
Trong đó: dp là gia số của biến dạng tích lũy; C và γ là hệ số đặc trưng của vật liệu. Từ hình 7, ta xác định được. $\frac{C}{\gamma} = 60MPa \rightarrow C = 19998MPa$

Ưu điểm của mô hình: mô hình động học phi tuyến tính đặc biệt đại diện cho hành vi của vật liệu. Nhược điểm: Nó ít đại diện hơn cho hành vi của vật liệu so với động học phi tuyến của mô hình; Phần nhựa biến thiên theo quy luật hàm mũ trong tải và dỡ tải.

3.3.5 Mô hình Chaboche

Luật ứng xử này bao gồm quá trình biến cứng đẳng hướng và quá trình biến cứng động học phi tuyến. Sự biến cứng này được thể hiện bằng:

$$f = J_2(\sigma - X) - R - \sigma_{yi} \quad (6)$$

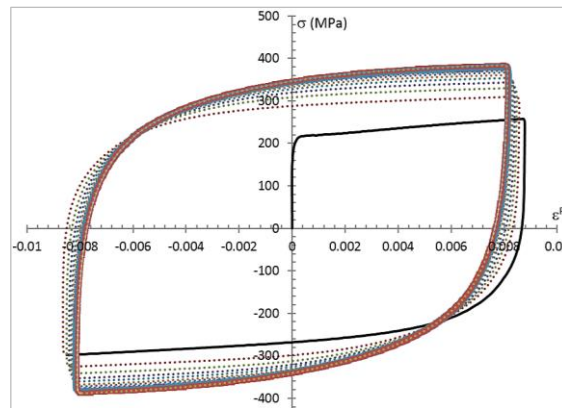


Hình 6. Đường cong biến cứng để xác định C.

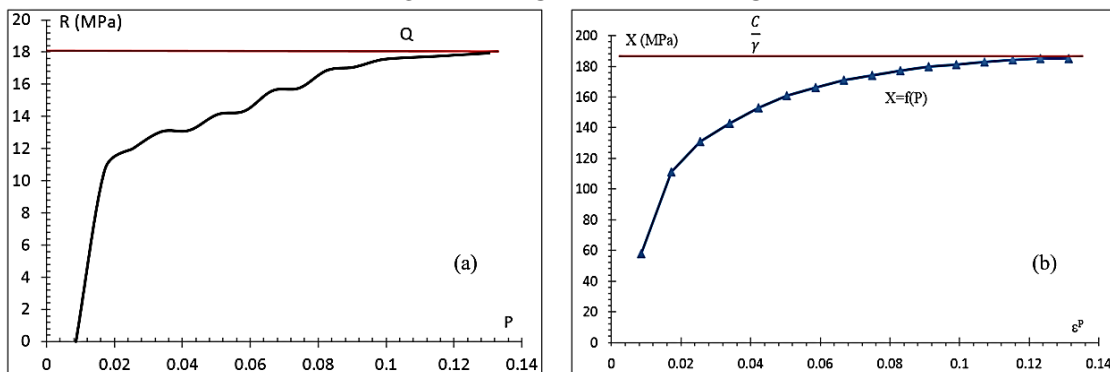
Đường cong đặt tải-dỡ tải theo chu kỳ $\sigma_{11} = f(\epsilon_p)$ được thể hiện trong hình 7. R và biến dạng dẻo tích lũy p được xác định cho mỗi chu kỳ, đường cong $R = f(p)$ nhận được như hình 8a. Ta có, $R = Q(1 - \exp(-bp))$, khi P tiến tới $+\infty$ thì R tiến tới Q. Từ đường cong $R=f(p) \rightarrow Q = 19$ MPa và $b = 5$. X và p được xác định cho mỗi chu kỳ theo công thức:

$$X = \sigma_{11} - \sigma_Y = \frac{C}{\gamma}(1 - \exp(-\gamma p)) \quad (7)$$

Từ đường cong $X = f(P)$ như hình 8b, các tham số C và γ được xác định: $C = 6604,5$ MPa và $\gamma = 35,7$.



Hình 7. Quan hệ ứng suất và biến dạng dẻo.

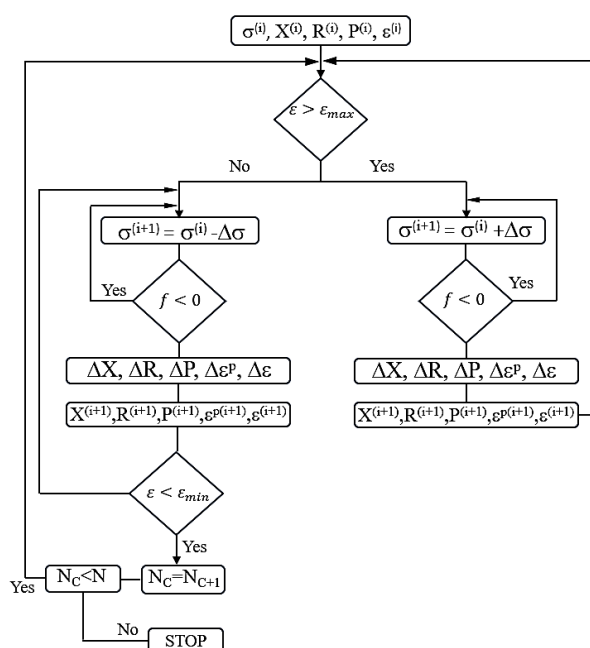


Hình 8. Mô hình Chaboche: (a) - Đường hướng phi tuyến; (b) - Động học phi tuyến.

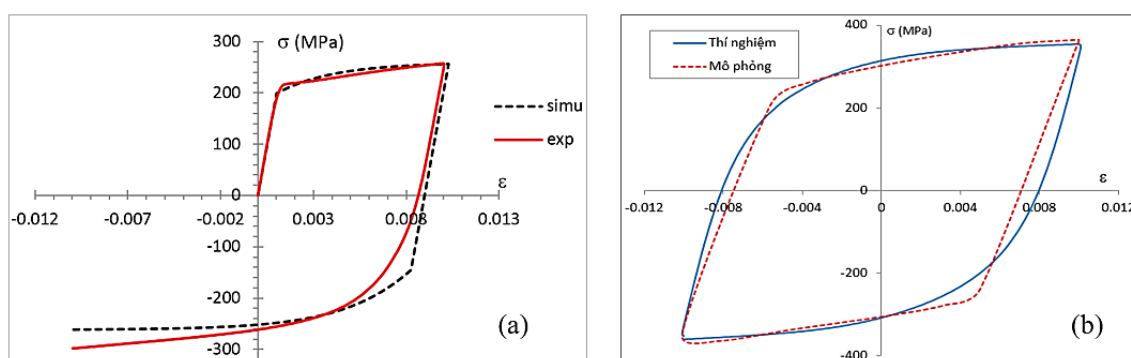
Mô hình là sự kết hợp của quá trình biến cứng động học và đẳng hướng, mang lại khả năng dự đoán rõ ràng về ứng xử của vật liệu. Nhược điểm, miền đàn hồi có thể thay đổi về kích thước và cũng có thể bị dịch chuyển trong không gian ứng suất.

3.3.6. Mô phỏng số ứng xử theo mô hình Chaboche

Trong phần này, một thuật toán mô phỏng số được đề xuất cho mô hình Chaboche để mô phỏng ứng xử cho thép 316L. Giá trị của các tham số trong mô hình được lấy từ tính toán trong phần trước. Thuật toán đề xuất được như trong hình 9. Kết quả thu được so sánh kết quả với thực nghiệm có sự khác biệt nhỏ giữa đường cong thực nghiệm và mô phỏng (hình 10) Vì vậy, có thể kết luận thuật toán đề xuất là phù hợp.



Hình 9. Thuật toán mô phỏng thí nghiệm nén kéo theo chu kỳ.



Hình 10. Kết quả số và thí nghiệm: (a)- Ở chu kỳ đầu tiên; (b) - Ở chu kỳ có biên độ ổn định.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã phân tích ứng xử biến cứng theo chu kỳ của 316L từ các chu kỳ đầu tiên. Các tham số biến cứng của thép 316L đã được xác định từ kết quả thực nghiệm và các mô hình ứng xử cũng được đánh giá để đưa ra ưu, nhược điểm của từng mô hình. Dựa trên những đánh giá này, một thuật toán mô phỏng ứng xử biến cứng theo mô hình Chaboche

được đề xuất. Thuật toán này cho phép dự đoán ứng xử cơ học của thép 316L và khẳng định mô hình Chaboche dường như là đại diện tiêu biểu nhất cho ứng xử của vật liệu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. G.K. Quainoo, S. Yannacopoulos, and A.K. Gupta “*Strengthening Characteristics of AA6111 Aluminum*” Canadian Metallurgical Quarterly, vol. 40(2), pp. 211 – 220, (2001).
- [2]. J. M. Meininger, S. L. Dickerson and J. C. Gibeling. “*Fatigue Fract*”. Eng. Mat. Struct., 19 (1), pp. 85-97, (1996).
- [3]. M. V. Borodii. Journal strength of mat., Vol 38, N°2, pp. 128-134, (2006).
- [4]. J.B.Kim, et.al., “*The Temperature Dependent Inelastic Material Characteristics of Cold-Worked 316L for NONSTA*,” Proc. of the KNS, (2005).
- [5]. Y.S. Ju, et.al. “*High-Temperature Low Cycle Properties of Cold-Worked 316L Stainless Steel*”, Proc. of the KNS, (2005).
- [6]. S.H. Lee, et.al. “*The Low Cycle Characteristics of Solution Annealed 316L Stainless Steel in High Temperature Conditions*”, (in preparation) Proc. of the KNS, (2006).
- [7]. Julie Colin, Ali Fatemi, Said Taheri “*Cyclic hardening and fatigue behavior of stainless steel 304L*”, J Mater Sci 46:145–154, (2011).
- [8]. E.S. Puchi-Cabrera a,b, M.H. Staia a, C. Tovar a, E.A. Ochoa-Pérez, “*High cycle fatigue behavior of 316L stainless steel*”, International Journal of Fatigue 30, pp. 2140–2146, (2008).
- [9]. H.W. Huang, a Z.B. Wang, a, J. Lub and K. Lua, “*Fatigue behaviors of AISI 316L stainless steel with a gradient nanostructured surface layer*”, Acta Materialia 87, 150–160, (2015).

ABSTRACT

Experimental study and numerical simulation of hardening behavior of steel 316L

Strain-hardening is a very significant parameter to evaluate the elastic behavior of a material, especially when numerically simulating the mechanical behavior of the material. In this study, cyclic tensile-compression tests for 316L steel samples were performed to determine the hardening parameters for models such as linear isotropic hardening, linear kinematic hardening, nonlinear isotropic hardening, nonlinear kinematic hardening, and Chaboche model. Thereby, the advantages and disadvantages of each model are assessed. Finally, behavior according to the Chaboche model was selected to propose building an algorithm for the numerical simulation of cyclic tensile-compression experiments. The obtained numerical results are in good agreement with the experimental results.

Keywords: Hardening; Austenitic steels; Cyclic behavior; Simulation; Finite element.