

NGHIÊN CỨU TRẠNG THÁI BIẾN DẠNG CỦA ỐNG THÉP HÀN CT3 TRONG QUÁ TRÌNH CÁN NGUỘI TRÊN MÁY CÁN PILGER MILL BẰNG CÁCH MÔ HÌNH HÓA MÔ PHỎNG TRÊN NỀN TẢNG ABAQUS/EXPLICIT

STUDY ON DEFORMATION STATE OF CT3 WELDED STEEL PIPE DURING COLD ROLLING PROCESS ON PILGER MILL BY SIMULATION MODELING ON ABAQUS/EXPLICIT PLATFORM

Huỳnh Công Lớn*, Lương Văn Tới

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

*Email: huynhconglon@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Xu hướng thay đổi ứng suất/ biến dạng và quỹ đạo dòng chảy vật liệu, ứng xử biến dạng của ống thép CT3 trong quá trình cán nguội bằng máy cán Pilger mill được nghiên cứu bằng mô hình số. Trên nền tảng ABAQUS/Explicit, mô hình phần tử hữu hạn (FME) đàn hồi-dẻo 3D được thiết lập và xác thực theo định luật bảo toàn năng lượng. Các thông số công nghệ chính yếu của mô hình được tính toán, chẳng hạn như định nghĩa hình học của hai con lăn cán có tiết diện thay đổi và có biên dạng rãnh cán parabol, hai con lăn cán chuyển động quay tròn phối hợp với chuyển động tịnh tiến và xoay của ống thép xung quanh trục đỡ trong lòng ống. Các kết quả chính cho thấy rằng: 1) Trong toàn bộ quá trình, ứng suất 3D dao động giữa ứng suất kéo và ứng suất nén. Trong vùng biến dạng tức thời, ứng suất hướng kính giữ không đổi dọc theo độ dày. Trong khu vực vành con lăn, ứng suất vòng và ứng suất trục trên bề mặt bên trong lớn hơn trên bề mặt bên ngoài, trong khi ngược lại ở đáy rãnh con lăn. (2) Trong quá trình cán nguội trên máy Pilger Mill toàn bộ ống, ứng suất hướng kính và vòng nén giảm trong khi ứng suất kéo dọc trục tăng. Trong vùng biến dạng tức thời, biến dạng vòng giữ nguyên theo chiều dày, trong khi biến dạng hướng tâm và hướng trục trên bề mặt bên trong lớn hơn một chút so với trên bề mặt bên ngoài.

Từ khóa: Pilger Mill; Tối ưu hóa thiết kế; FEM; Abaqus/Explicit; Trục lõi.

ABSTRACT

The stress/strain change trends and material flow trajectory, deformation behavior of CT3 steel pipe during cold rolling process by Pilger mill are studied by numerical model. Based on ABAQUS/Explicit platform, 3D elastic-plastic finite element (FME) model is established and validated according to the law of energy conservation. The main technological parameters of the model are calculated, such as the geometric definition of two rolling rollers with variable cross-section and parabolic groove profile, the two rolling rollers rotate in coordination with the translational and rotational motion of the steel tube around the support axis inside the tube. The

main results show that: (1) During the whole process, the 3D stress fluctuates between tensile stress and compressive stress. In the instantaneous deformation zone, the radial stress remains constant along the thickness. In the roller ring area, the hoop stress and axial stress on the inner surface are larger than on the outer surface, while the opposite is true at the bottom of the roller groove. (2) During cold rolling on the Pilger Mill of the whole tube, the radial stress and compression hoop stress decreases while the axial tensile stress increases. In the instantaneous deformation zone, the hoop strain remains the same along the thickness direction, while the radial and axial strains on the inner surface are slightly larger than those on the outer surface.

Keywords: *Deformation Behaviors; Cold Pilgering; CT3 Tube; Mandrel; Abaqus/Explicit.*

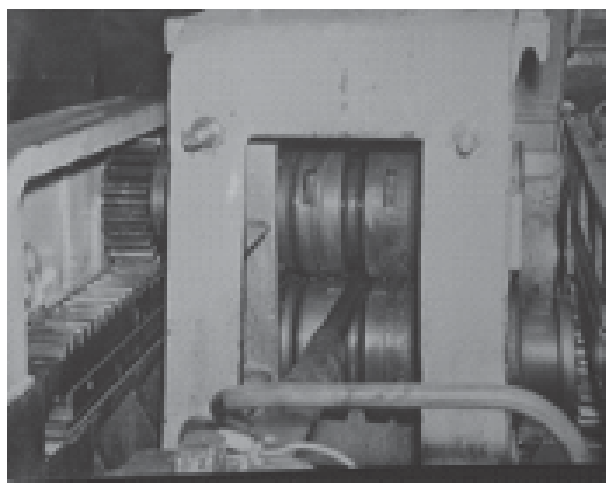
1. GIỚI THIỆU

Các loại ống thép hàn thường có nhược điểm là khả năng chịu được tải áp suất trong lòng ống rất là thấp, thường dưới 15bar. Trong khi đó, thực tế sử dụng cần những loại ống chịu được áp suất lên đến 250 bar, chỉ có ống đúc cán nóng thì mới đáp ứng được yêu cầu chịu tải áp suất lớn như vậy. Để nâng cao khả năng chịu được áp suất cao của ống, chúng ta có thể tiến hành gia công cán ống trên máy cán Pilger Mill, quy trình cán này sẽ làm vùng cán tăng nhiệt cục bộ lên rất cao làm cho vật liệu ở vùng đó nóng chảy. Máy cán Pilger có một bộ khuôn cán đôi có rãnh hình bầu dục dọc theo bề mặt khuôn và trục lõi (mandrel) đặt trong lòng ống, nó được xem như là đường dùng để xác định đường kính trong của ống thành phẩm [1-3]. Cán nguội trên máy cán Pilger Mill được coi là một trong những quy trình sản xuất hiệu quả nhất dùng để sản xuất ống. Trong công nghiệp, công nghệ này được áp dụng cho cả vật liệu sắt và không chứa sắt ngay cả khi chúng khó biến dạng. Nguyên liệu đầu vào của máy cán có thể bị biến dạng tới 95% chỉ trong một lần vận hành, giúp giảm đáng kể số lượng các hoạt động sản xuất cần thiết và cuối cùng dẫn đến

giảm chi phí sản xuất. Đồng thời, chất lượng cao của bề mặt ngoài và trong của ống và các đặc tính vật lý và cơ học rất cao thu được. Tuy nhiên, cán nguội ống trên máy Pilger Mill là một quá trình tạo hình đàn dẻo phi tuyến ba chiều và không ổn định với các hành vi biến dạng phức tạp bao gồm xu hướng thay đổi ứng suất/biến dạng và quỹ đạo dòng vật liệu. Các hành vi biến dạng phức tạp sẽ gây ra tính dị hướng đáng kể và ảnh hưởng đến khả năng tạo hình và hiệu suất tiếp theo của ống thép cuối cùng. Do đó, điều cần thiết là phải thiết lập một mô hình phần tử hữu hạn 3D để nghiên cứu xu hướng thay đổi ứng suất/biến dạng và quỹ đạo dòng vật liệu trong quá trình cán nguội của ống thép hàn CT3. Trong bài báo này, một mô hình mô phỏng 3D được tạo ra trên nền tảng ABAQUS/Explicit để mô phỏng quá trình biến đổi ứng suất và ứng xử biến dạng của ống thép CT3 có đường kính 49mm chiều dày 5mm được cán nguội thành ống có đường kính 25.4mm và dày thành 3mm trong dây chuyền cán nguội Pilger Mill. Trên cơ sở kết quả mô phỏng, ta có thể lựa chọn được các thông số kết cấu và thông số công nghệ cho quy trình cán nguội thép ống CT3 trên dây chuyền cán nguội Pilger Mill.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Quy trình cán nguội trên máy Pilger Mill

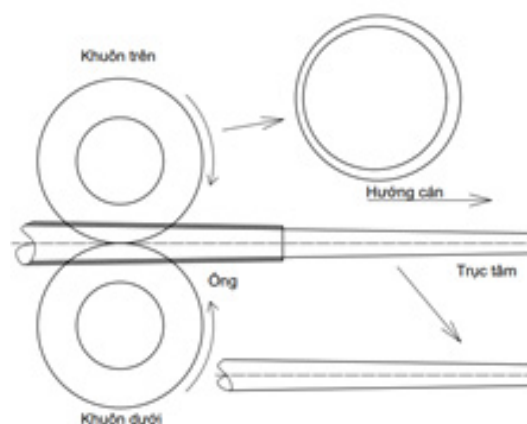


Hình 1. Cụm cán của máy cán nguội Pilger Mill

Ngược lại với các quy trình sản xuất ống khác, cán ống nguội được thực hiện trên máy cán Pilger Mill có tính chất tuần hoàn. Trong quy trình này [1], giá cán có khả năng thực hiện chuyển động theo chiều dọc. Các con lăn được gắn vào giá cán di chuyển và chúng quay theo các hướng ngược nhau như thể hiện trong Hình 1. Các con lăn có rãnh tròn và bán kính thay đổi được sử dụng trong quy trình này. Mặt cắt ngang rãnh tại mặt phẳng vào bằng với mặt cắt ngang của ống ban đầu trong khi tại mặt phẳng ra bằng với mặt cắt ngang của sản phẩm cuối cùng. Đường kính của rãnh cũng được lựa chọn chính xác. Ở cả hai vị trí quan trọng của giá (phía sau - lõi vào của vật liệu ban đầu và phía trước - lõi ra của sản phẩm cuối cùng), không có tiếp xúc giữa các con lăn và vật liệu. Sau đó, vật liệu được cán dọc theo thanh trục hình nón. Chu kỳ cán bắt đầu khi giá được đặt tại vị trí chết phía sau. Sau đó, ống ban đầu được dịch chuyển một khoảng cách tiến nhỏ và đồng thời xoay $60^\circ - 90^\circ$ quanh trục của nó.

2.2. Xây dựng mô hình mô phỏng cho quá trình cán nguội trên máy Pilger Mill

Các thông số công nghệ mô hình hóa chính bao gồm thông số hình học của bánh cán, rãnh cán, lõi và ống thép CT3, mô hình cấu thành vật liệu, điều kiện tương tác, chuyển động tọa độ của các công cụ và chiến lược chia lưới được giải quyết. Mô hình hình học chứa các con lăn có tiết diện thay đổi, trục hình parabol, vòng chặn và ống, Hình 2. Con lăn được định nghĩa là cứng rời rạc, trong khi trục và vòng chặn được định nghĩa là cứng phân tích để cải thiện hiệu quả mô phỏng. Ống được gọi là rắn biến dạng. Mô hình vật liệu đàn hồi-dẻo được sử dụng để xác định ống thép CT3 và bảng 1 hiển thị các thông số đặc tính của vật liệu ống. Để đảm bảo độ chính xác của mô phỏng, tổng cộng 12424 nút tuyển tính, tích hợp giảm được áp dụng cho ống trong quá trình đóng cọc nguội ống. Các thông số kỹ thuật và thông số làm việc của quy trình cán thực tế như sau: đường kính ống vào $d_{in} = 49\text{mm}$, chiều dày thành ống $h_1 = 5\text{mm}$, khoảng tịnh tiến mỗi chu kỳ cán 5mm, góc xoay 75° , đường kính ống ngõ ra $d_{out} = 25.4\text{mm}$, chiều dày thành ống $h_2 = 3\text{mm}$. Thông số cơ lý của ống thép CT3 được cho trong bảng 1.



Hình 2. Quy trình cán ống trên máy cán nguội Pilger Mill



Bảng 1. Bảng thông số cơ lý tính của thép CT3.

Mô đun đàn hồi, E (Mpa)	2.1*10E6
Khối lượng riêng, ρ (g/cm ³)	7.85
Hệ số Possion	2.85
Giới hạn bền, σ (N/mm ²)	375

Để đảm bảo kết quả mô phỏng phản ánh đúng với kết quả thực tế thì các thông số cán của quá trình cán được chọn đúng với quá trình cán thực tế như trong bảng 2.

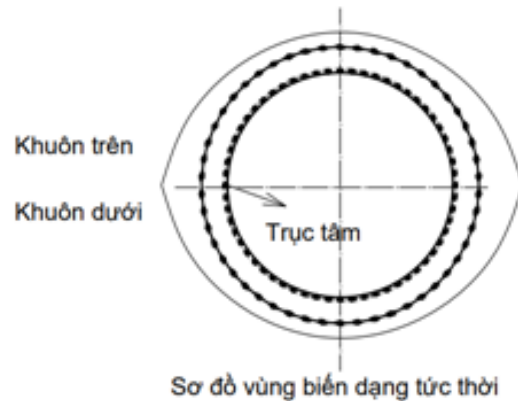
Bảng 2. Thông số cán nguội trên máy cán Pilger Mill

Vận tốc bánh cán, v (mm/s)	670
Vận tốc quay bánh cán, n (rad/s)	3,75
Vận tốc tịnh tiến của ống, v_1 (mm/s)	3
Vận tốc quay của ống, n_1 (rad/s)	1.9
Thời gian cho hành trình tiến bánh cán (s)	1
Thời gian cho hành trình lui bánh cán (s)	1
Thời gian ống chạy tới (s)	1
Thời gian ống quay (s)	1

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phương pháp mô phỏng

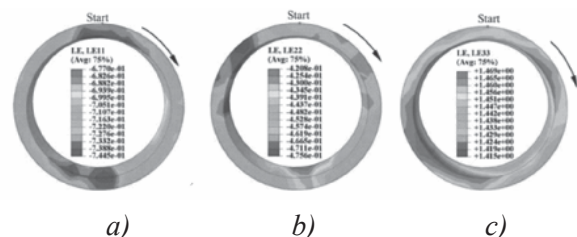
Ống trong vùng biến dạng tức thời được coi là mục tiêu để nghiên cứu trạng thái ứng suất và biến dạng tức thời. Như thể hiện trong hình 2, hai đường tròn được vẽ trên mặt ngoài và mặt trong của ống và tổng cộng 46 điểm được đánh dấu đồng nhất trên mỗi đường. Để nghiên cứu xu hướng thay đổi ứng suất/biến dạng theo thời gian và quỹ đạo dòng chảy vật liệu trong toàn bộ quá trình, một điểm “A” được đánh dấu ở đầu trước của ống, thể hiện trong hình 2. Sau đó, ứng suất, biến dạng và tọa độ của điểm này được đo sau mỗi 1 giây.



Hình 3. Vùng biến dạng tức thời

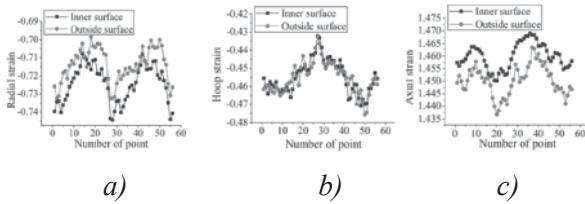
3.2. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Hình 4 (a)-(c) là đường đồng mức biến dạng không gian trong vùng biến dạng tức thời và Hình 5 (a)-(c) cho thấy sự so sánh các biến dạng 3D tương ứng giữa các bề mặt bên ngoài và bên trong. Có thể thấy rằng sự khác biệt giữa các giá trị biến dạng cực đại và cực tiểu nhỏ hơn 0,1. Do đó, biến dạng 3D là đồng nhất trong vùng biến dạng tức thời. Cũng có thể thấy rằng biến dạng vòng trên bề mặt bên ngoài gần giống với biến dạng trên bề mặt bên trong, trong khi biến dạng hướng tâm và hướng trục trên bề mặt bên trong lớn hơn một chút so với biến dạng trên bề mặt bên ngoài. Điều này là do vật liệu trên bề mặt bên trong chảy dễ dàng hơn do khoảng hở giữa ống và trục.



Hình 4. So sánh các biến dạng 3D giữa bề mặt bên ngoài và bên trong của ống thép:

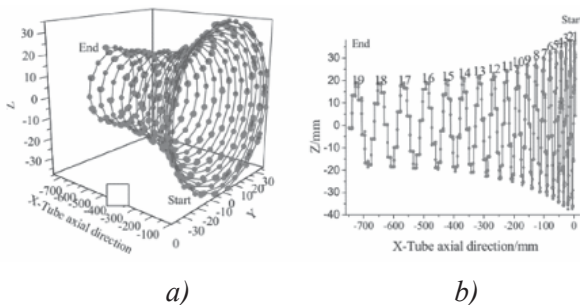
- (a) Đường bao của biến dạng xuyên tâm,
- (b) Đường bao của biến dạng vòng,
- (c) Đường bao của biến dạng dọc trục



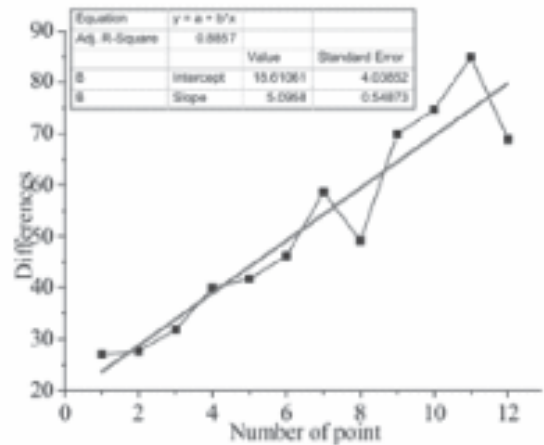
Hình 5. So sánh các biến dạng 3D giữa bề mặt bên ngoài và bên trong của ống thép:

(a) Biến dạng xuyên tâm, (b) Biến dạng vòng, (c) Biến dạng trục

Hình 6(a) cho thấy quỹ đạo dòng vật liệu. Có thể thấy rằng điểm vật liệu di chuyển về phía trước dọc theo quỹ đạo xoắn ốc. Điều này là do ống cấp liệu và ống quay. Hình 7(b) cho thấy hướng nhìn theo mặt phẳng X-O-Z của quỹ đạo này, trục X và trục Z lần lượt đề cập đến chiều dài của ống và đường kính ống. Có thể thấy rằng đường kính ống giảm dần cho đến khi duy trì không đổi. Giá trị X của 19 điểm trong hình 7(b) được đọc và biểu diễn trên hình 7. Có thể thấy rằng khoảng cách giữa hai chu kỳ lân cận tăng gần như tuyến tính. Điều này là do độ giãn dài của ống trong quá trình cán nguội ống trên dây chuyền Pilger Mill. Do đó, độ giãn dài của ống tăng gần như tuyến tính trong quá trình cán nguội ống. Kết quả này có thể giúp thiết kế rãnh cán phù hợp với từng nguyên liệu ống và từng loại sản phẩm ống ở đầu ra.



Hình 6. Sơ đồ quỹ đạo dòng chảy vật liệu:
(a) Góc nhìn không gian, (b) Góc nhìn X-O-Z



Hình 7. Sự khác biệt giữa các độ giãn dài của ống

4. KẾT LUẬN

Dựa trên nền tảng ABAQUS/Explicit, mô hình 3D-FEM được thiết lập để nghiên cứu toàn bộ quá trình cán nguội ống CT3 trên dây chuyền cán Pilger Mill. Trong bài báo này, trạng thái ứng suất/biến dạng trong vùng biến dạng, xu hướng thay đổi ứng suất/biến dạng và quỹ đạo vật liệu trong toàn bộ quá trình được nghiên cứu.

(1) Ứng suất phân bố dao động có thể gây ra hỏng bề mặt. Do đó, việc kiểm soát trạng thái ứng suất trong vùng biến dạng tức thời là điều cần thiết để ngăn ngừa hỏng hóc và cải thiện chất lượng tạo hình. (2) Các đặc điểm phân bố ứng suất 3D khác nhau có thể gây ra nhiều phân bố kết cấu khác nhau. Do đó, việc kiểm soát phần trăm biến dạng 3D là điều cần thiết để kiểm soát phân bố kết cấu trong ống cuối cùng. (3) Độ giãn dài của ống tăng tuyến tính trong quá trình pilgering toàn bộ ống, điều này cần được xem xét khi thiết kế con lăn và trục. ❖



Ngày nhận bài: 10/02/2025

Ngày phản biện: 27/02/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. S. Muot, A. Hacquin, P. Montmitonnerin, “3D finite element simulation of cold pilgering”. Journal of Material Processing Technology, Vol. 60 (1996), 505-512.
- [2]. Carscallen, W.E., Jeswiet, J., Oosthuizen, P.H., “Optimization of a Cooling System: the Cooling of Pilgered Seamless Tubes”. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 43, (1994).
- [3]. V.M. Prajapati, B.D. Patel, “Fatigue analysis of mandrel use in tube drawing process”. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1 Issue 10, December-2012.
- [4]. V.M. Prajapati, “Design, Optimization and Analysis of Cold Pilger Mill Mandrel for Tube Drawing Using Cad Software”. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).
- [5]. S. Nantha Gopan, M. Gowtham, J. Kirubakaran Vivek, R. Rajesh, S. Ramakrishnan, “Design and Analysis of Adjustable Inside Diameter Mandrel for Induction Pipe Bender”. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume10, Number 1 - Apr 2014.
- [6]. S.Z. Qamar, “Effect of heat treatment on mechanical properties of H11 tool steel”. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 35/2 (2009), 115-120.
- [7]. J. Osika, “Walcowanie rur na zimno w walcarkach pielgrzymowych”. Uczelniane Wydawnictwa Naukowe – Dydaktyczne AGH (2004).
- [8]. Metal Forming Handbook /Schuler (c) Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.
- [9]. Metal Forming Processes. Zainul Huda, Springer Nature Switzerland AG, 2024.
- [10]. Argha Dutta, Apu Sarkar, N. Gayathri, Sandip Bysakh, Arpan Arora, Santu Dey, S. Srivastava, Suhrit Mula & P. Mukherjee, “Effects of Cold Rolling-Induced Defects on Proton Irradiation Response in Nb-1Zr-0.1C Alloy”. Nuclear Science and Engineering, 2024.
- [11]. Abe, H. and Furugen, M., “Method of Evaluating Workability in Cold Pilgering of Zirconium Alloy Tube”. Materials Transaction, Vol 51 (2010).
- [12]. Abe, H. and Furugen, M., “Method of Evaluating Workability in Cold Pilgering”. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212 (2012).