

NGHIÊN CỨU TIÊU CHÍ MẤT ỔN ĐỊNH THỦY LỰC ỐNG DỰA TRÊN MÔ PHỎNG PHẦN TỬ HỮU HẠN VÀ THỰC NGHIỆM

INVESTIGATION OF INSTABILITY CRITERION OF TUBE HYDROFORMING BASED ON FINITE ELEMENT SIMULATIONS AND EXPERIMENTS

Nguyễn Chung¹, Ngô Sỹ Đồng²

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

²Trường Đại học Điện lực

TÓM TẮT

Để dự đoán sự bất ổn định thủy lực ống (THF), sử dụng phần mềm Dynaform thiết kế và mô phỏng phần tử hữu hạn (FE) mô hình 3D và thử nghiệm thủy lực ống với ống thép không gỉ SS304. Theo kết quả mô phỏng, mối quan hệ giữa áp suất bên trong của các điểm trên mặt cắt ngang trong khu vực thủy lực ống tự do và khi gia tăng áp lực thì gia tăng biến dạng hướng tâm và gia tăng biến dạng thực hướng tâm. Rút ra một số dự đoán sự bất ổn của hình dạng thủy lực ống trong mô phỏng bằng cách sử dụng ba tiêu chí không ổn định dựa trên ba đường cong mô phỏng. Bằng cách so sánh các lỗi tương đối, tương ứng ba giá trị của gia số áp lực, biến dạng hướng tâm và biến dạng thực hướng tâm trong mô phỏng và thực nghiệm, lỗi tương đối trung bình giữa giá trị mô phỏng và giá trị thực nghiệm tại thời điểm nứt hướng tâm nhỏ nhất là 14,41%; Áp lực bên trong hướng tâm tăng đến giá trị xác định thì biến dạng ống là lớn nhất.

Từ khóa: Thủy lực ống (THF); Phần tử hữu hạn (FE); Tiêu chí không ổn định.

ABSTRACT

To predict Tube Hydro-Forming (THF), using Dynaform software to design and simulate Finite Element (FE) 3D models and test tube hydraulics with SS304 stainless steel tube. According to the simulation results, the relationship between the internal pressure of points on the cross-section in the free-tube hydraulic area and the increase in pressure, the increase in radial strain and the increase in radial real strain. Derive some instability predictions of tube hydraulic geometry in simulation using three instability criteria based on three simulation curves. By comparing the relative errors of the three values of pressure increment, radial strain and true radial strain in simulation and experiment, the mean relative error between the simulated value and the actual value The test at the time of the smallest radial cracking is 14.41%; The radial internal pressure increases to the specified value, the tube deformation is the largest.

Keywords: Tube Hydro-Forming (THF); Finite Element (FE); The criteria are not stable. 

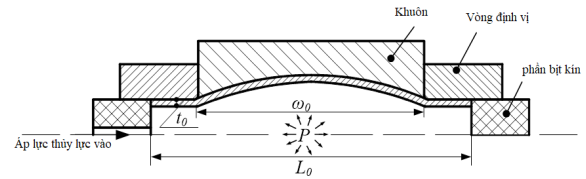
1. LỜI NÓI ĐẦU

Công nghệ tạo hình dạng ống Tube hydroforming (THF) là công nghệ tạo hình tiên tiến sử dụng áp suất cao bên trong ống để sản xuất các bộ phận nguyên khối rỗng và thành mỏng có hình dạng mặt cắt phức tạp. So với các bộ phận được sản xuất theo quy trình sản xuất truyền thống như dập và hàn, nó có các đặc điểm tích hợp quy trình cao, độ cứng cao và các bộ phận nhẹ, nó được sử dụng rộng rãi trong ngành ô tô, hàng không, vũ trụ, tàu thủy, thiết bị gia dụng và các lĩnh vực khác [1].

Trong nghiên cứu này, phân tích mối quan hệ áp suất bên trong - độ tăng chiều cao phồng lên của ống ($P-\Delta H$), áp suất bên trong - độ tăng biến dạng kỹ thuật xuyên tâm ($P-\Delta \epsilon$) và áp suất bên trong - độ tăng biến dạng thực hướng tâm tại điểm trên phần của vùng phồng ống trong mô phỏng ($P-\Delta \epsilon$). Bằng cách tính toán ba kích thước của thử nghiệm và mô phỏng ống thép không gỉ SS304, điểm phình ra trên diện tích mặt cắt ngang ống theo ΔH , $\Delta \epsilon$ và $\Delta \epsilon$ và ba đại lượng ở giá trị mô phỏng giới hạn thời gian đứt và giá trị thử nghiệm, sai số tương đối và giá trị trung bình sai số để xác minh độ chính xác của sự mất ổn định hình thành ống trong mô phỏng dựa trên ba đường cong $P-\Delta H$, $P-\Delta \epsilon$ và $P-\Delta \epsilon$.

2. THỬ NGHIỆM ĐỘ PHỒNG THỦY LỰC ỐNG

Trong thử nghiệm này sử dụng vật liệu ống thép không gỉ SS304, thành phần hóa học nêu trong bảng 1, ứng suất chảy của vật liệu là 360 MPa. Đường kính ngoài ống là 32 mm và độ dày thành ống là 0,6 mm. Chiều dài ống L_0 và chiều dài vùng phồng ω_0 .



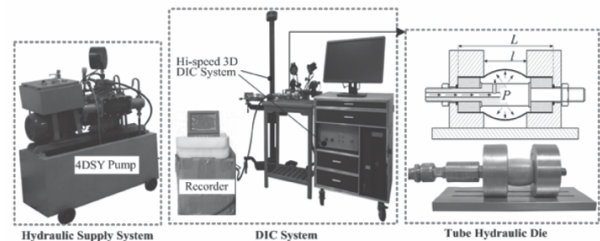
Hình 1. Sơ đồ các thông số trong quá trình phồng ống

Bảng 1. Thành phần hóa học của ống thép không gỉ SS304:

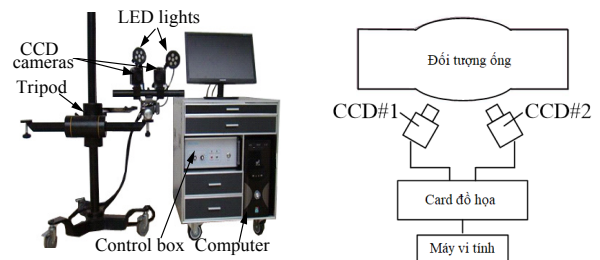
Ký hiệu	Thành phần hóa học chính (%)		
OCr18Ni9	C($\leq 0,07$)	Ni (8,0~11,0)	Cr (17.0 ~19.0)

Bảng 2. Ba loại ống thép không gỉ SS304 được sử dụng thử nghiệm:

L_0 (mm) $\times$ ω_0 (mm)	Trạng thái cuối ống
110 $\times$ 48	Ống tự do
150 $\times$ 90	Ống tự do
150 $\times$ 48	Ống bị chặn

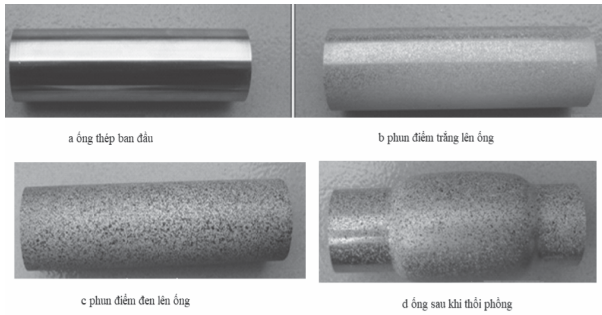


Hình 2. Thiết bị làm phồng ống thủy lực được sử dụng trong thử nghiệm

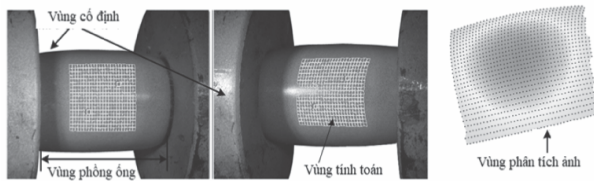


(a) Ảnh thực tế (b) Sơ đồ nguyên lý làm việc

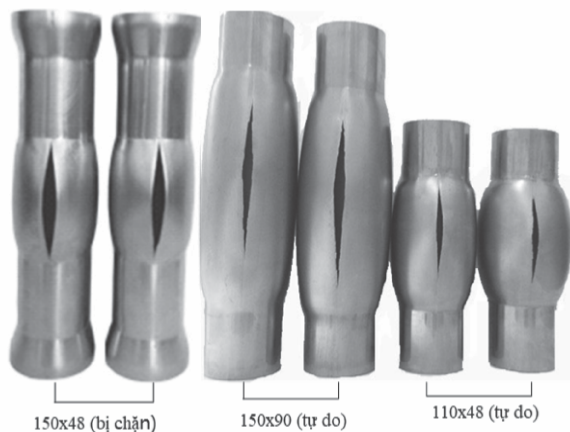
Hình 3. Kiểm tra hệ thống đo biến dạng ba chiều



Hình 4. Xây dựng điểm lổm đốm trên bề mặt ống



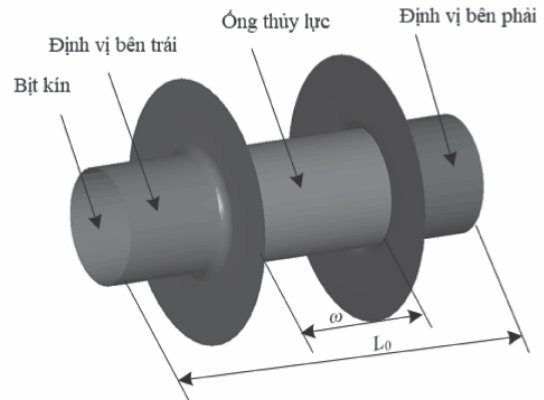
Hình 5. Kết quả quá trình xử lý của hệ thống đo lường và phân tích biến dạng 3D



Hình 6. Các đường ống bị vỡ và hỏng điển hình sau khi thử nghiệm

3. MÔ PHỎNG PHÒNG ỐNG THỦY LỰC

Để dựa trên tiêu chí không ổn định FEM biểu hiện mất ổn định phòng thủy lực của ống và dự đoán độ không ổn định của đường ống mới, nghiên cứu trên 3 ống thép không gỉ SS304 sử dụng phần mềm mô phỏng Dynaform. Sử dụng phần mềm PRO/E thiết lập mô hình hình học của hệ thống như được thể hiện trên hình 7.

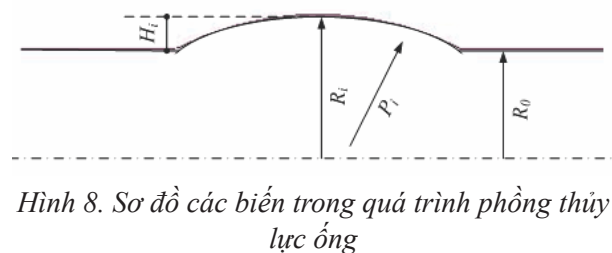


Hình 7. Mô hình mô phỏng phòng thủy lực ống

Sau khi tính toán và xử lý bởi phần mềm mô phỏng Dynaform để phân tích mối quan hệ giữa áp suất và chiều cao phòng tăng. Trong mô phỏng bằng phần mềm Dynaform, các nội áp lực của đường ống được trích xuất giá trị chiều cao phòng lớn nhất xuyên tâm của điểm trên mặt cắt trong vùng phòng ống.

4. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THỬ NGHIỆM

Ở đây, nghiên cứu mô phỏng quá trình thổi phồng ống tại các mặt cắt ngang khu vực điểm cao nhất của bán kính, tính toán bố trí biến dạng gia tăng chiều cao phòng ống. Từ áp suất bên trong và sự gia tăng chiều cao phòng ống, mối quan hệ giữa biến dạng thực sự và gia tăng biến dạng kỹ thuật.



Hình 8. Sơ đồ các biến trong quá trình phòng thủy lực ống

Yêu cầu trong các biến quá trình phòng ống phân tích như trong hình 9, trong đó:

P_i - Áp suất bên trong của ống tại thời điểm bất kỳ;

R_i - Bán kính phình ra tối đa trên mặt cắt tại điểm bất kỳ;

R_0 - Bán kính ban đầu của ống;

H_i - Chiều cao phòng ống, $H_i = R_i - R_0$.

$$\text{Biến dạng kỹ thuật } \varepsilon, \varepsilon_i = \frac{R_i - R_0}{R_0} = \frac{H_i}{R_0}$$

$$\text{Biến dạng thực } e, e_i = \ln(1 + \varepsilon_i)$$

Độ tăng chiều cao phòng lên:

$$\Delta H_i = H_i - H_{i-1}$$

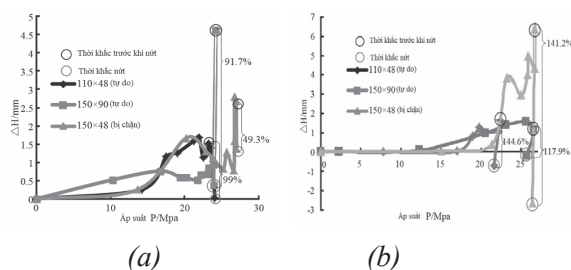
Sự gia tăng biến dạng kỹ thuật:

$$\Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}$$

Sự gia tăng biến dạng thực:

$$\Delta e_i = e_i - e_{i-1}$$

4.1. Dựa trên tiêu chí bất ổn của đường cong P-ΔH



Hình 9. Đường cong P-ΔH:

(a) Thu được bằng mô phỏng;

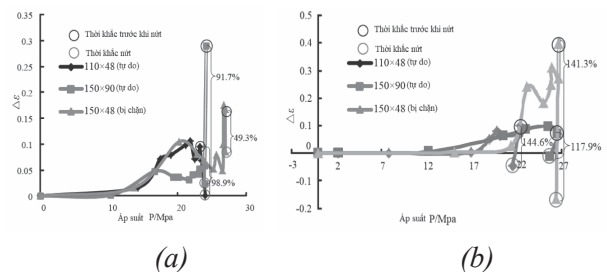
(b) Thu được bằng thực nghiệm

Sử dụng mô phỏng Dynaform để thu được ba đường cong áp suất bên trong - độ tăng chiều cao phòng lên (P- ΔH) bao gồm dữ liệu của các điểm trên mặt cắt ngang của vùng

phòng trong ba sơ đồ thử nghiệm, như thể hiện trong hình 9 (a), từ sự đứt gãy từ thời điểm trước đó đến thời điểm bị vỡ, sự gia tăng chiều cao phòng lên sẽ giảm mạnh. Đối với ống 110×48 (tự do), giá trị giảm ΔH cao tới 99%; đối với ống 150×90 (tự do), giá trị giảm ΔH là 91,7%; đối với ống 150×48 (bị chặn), mức giảm ΔH là 49,3%. Hình 9 (b) là đường cong P-ΔH thu được từ số liệu thí nghiệm, có thể thấy trong thí nghiệm, giá trị ΔH của điểm trên tiết diện của vùng phòng lên cũng có sự thay đổi đột ngột tại thời điểm hiện tượng này phù hợp với hiện tượng của quá trình mô phỏng.

4.2. Dựa trên tiêu chí bất ổn của đường cong P- Δε

Sử dụng phần mềm mô phỏng Dynaform để thu được ba đường cong áp suất bên trong - gia tăng biến dạng kỹ thuật P-Δε bao gồm dữ liệu của các điểm trên mặt cắt ngang của vùng phòng trong ba sơ đồ thử nghiệm, như thể hiện trong hình 10 (a), đối với ống 110×48 (tự do), mức giảm cao tới 98,9%; đối với ống 150×90 (tự do), mức giảm là 91,7%; đối với ống 150×48 (bị chặn), mức giảm là 49,3%. Hình 10 (b) là đường cong P-Δε thu được bằng thực nghiệm, có thể thấy trong thử nghiệm, độ phòng của giá trị điểm diện tích mặt cắt ngang trong đó giới hạn thời gian đứt đột biến, hiện tượng này với các sự kiện mô phỏng trùng khớp.

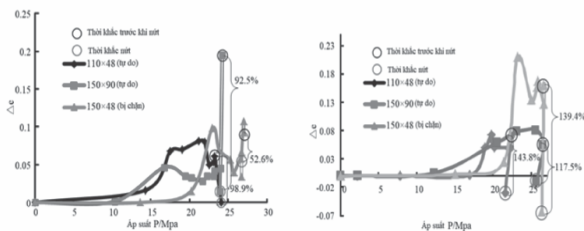


Hình 10. Đường cong P-Δε

(a) Thu được bằng mô phỏng; (b) Thu được bằng thực nghiệm

4.3. Dựa trên tiêu chí độ không ổn định của đường cong P-Δε

Sử dụng mô phỏng Dynaform để thu được ba đường cong áp suất bên trong - đường cong gia tăng biến dạng thực (P-Δε) bao gồm dữ liệu của các điểm trên mặt cắt ngang trong vùng phòng, như thể hiện trong hình 11 (a), từ thời điểm trước khi đứt đến thời điểm vỡ, biến dạng thực sẽ giảm mạnh. Đối với ống 110×48 (tự do), mức giảm cao tới 98,9%; đối với ống 150×90 (tự do), mức giảm Δε là 92,5%; đối với ống 150×48 (bị chặn), mức giảm Δε là 52,6%. Hình 11 (b) Chương trình các thực nghiệm thu được các đường cong P-Δε, có thể thấy trong các thử nghiệm, phòng của điểm diện tích mặt cắt ngang giá trị cũng thời hạn vỡ sự hiện diện của đột biến, hiện tượng này so với các mô phỏng trùng khớp.



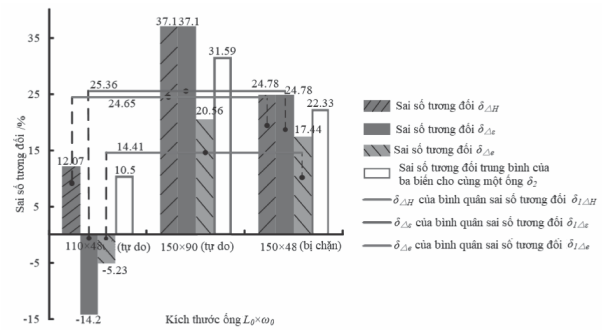
(a) (b)
Hình 11. Đường cong P-Δε:

(a) Thu được bằng mô phỏng;
(b) Thu được bằng thực nghiệm

Tóm lại, trong quá trình mô phỏng và thực nghiệm THF, ba đường cong P-ΔH, P-Δε và P-Δe tại điểm của mặt cắt trong vùng phòng đều có sự thay đổi đột ngột tại thời điểm giới hạn đứt. Có thể thấy rằng, kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn thực hiện trong nghiên cứu này là hợp lý trong một phạm vi nhất định, và dựa trên sự thay đổi đột ngột của ΔH, Δε và Δe và để xác định rằng sự mất ổn định của đường ống trong mô phỏng có độ tin cậy nhất định.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Dựa vào ba đường cong trên làm tiêu chí để đánh giá mô phỏng có mất ổn định hay không, bằng cách so sánh điểm trên mặt cắt trong vùng phòng tại thời gian đứt giới hạn ΔH, Δε và Δe và giá trị mô phỏng và thử nghiệm của ba biến, sai số tương đối và sai số trung bình, để xác minh những điều đã nói ở trên. Độ chính xác của độ không ổn định mô phỏng được dự đoán dựa trên ba đường cong làm tiêu chí độ không ổn định.



Hình 12. Tỷ lệ sai số tương đối của ΔH, Δε và Δe tại thời điểm ống nứt

Lưu ý: mp (mô phỏng); tn (thực nghiệm).

Sai số tương đối của tăng chiều cao phòng lên:

$$\delta_{\Delta H} = \frac{\Delta H_{mp} - \Delta H_{tn}}{\Delta H_{tn}} \times 100\%$$

Sai số tương đối gia tăng biến dạng kỹ thuật:

$$\delta_{\Delta \epsilon} = \frac{\Delta \epsilon_{mp} - \Delta \epsilon_{tn}}{\Delta \epsilon_{tn}} \times 100\%$$

Sai số tương đối của sự gia tăng biến dạng thực tế:

$$\delta_{\Delta e} = \frac{\Delta e_{mp} - \Delta e_{tn}}{\Delta e_{tn}} \times 100\%$$

Sai số tương đối trung bình:



$$\delta_1 = \frac{|\delta_{110 \times 48}(\text{tự do})| + |\delta_{150 \times 90}(\text{tự do})| + |\delta_{150 \times 48}(\text{bị chặn})|}{3}$$

Sai số tương đối trung bình:

$$\delta_2 = \frac{|\delta_{JH}| + |\delta_{Jt}| + |\delta_{J\epsilon}|}{3}$$

6. KẾT LUẬN

Qua kiểm tra phòng thủy lực ống và mô phỏng của thép không gỉ SS304 với ba thử nghiệm các thông số thể hiện trong Bảng 2, các phòng tăng chiều cao, tăng biến dạng kỹ thuật và tăng biến dạng thực sự của các điểm trên phần trong vùng phòng thu được thông qua các tính toán lý thuyết có liên quan. Các giá trị thực nghiệm và mô phỏng, và phân tích mối quan hệ giữa độ phòng gia tăng áp suất và chiều cao, biến dạng kỹ thuật và gia tăng biến dạng thực, các kết luận sau:

(1) Trong ba sơ đồ thử nghiệm, sai số tương đối giữa giá trị mô phỏng và giá trị thử nghiệm tại thời điểm đứt gãy giới hạn của đường cong P- $\Delta\epsilon$ là nhỏ nhất và sai số tương đối trung bình $\delta_{\Delta\epsilon}$ nhỏ nhất, là 14,41%. P- ΔH là thứ hai, với sai số tương đối trung bình là 24,65%. P- $\Delta\epsilon$ sai số tương đối trung bình là lớn nhất, đạt 25,36%. Vì vậy, trong đường ống mô phỏng phòng thủy lực, đường cong được sử dụng để dự đoán bất ổn ống và độ chính xác dự đoán của nó là cao hơn so với đường cong P- ΔH , P- $\Delta\epsilon$.

(2) Ba đường cong như phán đoán không ổn định ngoài tiêu chuẩn, đối với mô hình ống 110×48 (tự do), sai số tương đối trung

bình thời gian đứt δ_2 là nhỏ nhất, là 10,5%. Sai số tương đối trung bình ống 150×48 (bị chặn) là thứ hai, 22,33%. Sai số tương đối trung bình 150×90 (tự do) là lớn nhất, cao nhất là 31,59%. Dự đoán rằng đối với thử nghiệm phòng thủy lực với các đầu ống tự do, chiều dài của vùng phòng ống càng ngắn thì giá trị sai số tương đối của dự đoán càng nhỏ. Đối với mô hình ống có cùng chiều dài vùng phòng, giá trị sai số tương đối dự đoán dưới trạng thái hạn chế của đầu ống lớn hơn sai số của trạng thái tự do của đầu ống. ❖

Ngày nhận bài: 03/6/2023

Ngày phản biện: 17/6/2023

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Tao ZN, Yang LF, Mao XC. *The Research of Methods of Bursting in Tube Hydro-forming* [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*. 2012, 3:20-24.
- [2]. Lianfa Yang, Guolin Hu, Jianwei Liu. *Investigation of forming limit diagram for tube hydroforming considering effect of changing strain path* [J]. *Int J Adv Manuf Technol*. 2015, 79:793-803.
- [3]. Wang Dong, Wang Hui, *A New Method to Predict the Left Side of the Forming Limit Diagram Based on the Finite Element Method* [J]. *Machine Building & Automation*. 2005, 34(3):74-76.
- [4]. Wang Hui, Gao Lin, Zhao Mingqi. *A new method to predict the forming limit of sheet metal based on finite element simulation* [J]. *Journal of Shangdong University (Engineering Science)*. 2006, 36(2):95-98.