

Dự đoán sự phân bố ứng suất dư và biến dạng khi hàn ống thép không gỉ 316L bằng phần mềm Sysweld

Predicting residual stresses and distortions in welding 316L stainless steel pipes using Sysweld software

Nguyễn Hồng Thanh^{1,2*}, Hoàng Trọng Ánh¹, Nguyễn Tiến Dương², Hà Xuân Hùng³

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định

²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

³Trường Đại học Lao động - Xã hội

* Email: thanh.we@gmail.vn

Mobile: 0942283232

Tóm tắt

Từ khóa:

Biến dạng hàn; Mô phỏng số; Phương pháp hàn GTAW; Thép không gỉ 316L; Ứng suất dư.

Ngày nay, thép không gỉ là loại vật liệu được ứng dụng rộng rãi trong chế tạo dụng cụ, thiết bị y tế; đường ống dẫn, bồn bể chứa chịu nhiệt và chịu ăn mòn hóa học... Công nghệ hàn được ứng dụng ngày càng nhiều vào trong quá trình tạo ra các sản phẩm. Trong quá trình hàn, nhiệt lượng cung cấp để làm nóng chảy kim loại cơ bản và dây hàn (nếu có) để tạo thành mối hàn mang tính cục bộ. Chính điều này dẫn đến sự hình thành ứng suất dư và biến dạng hàn làm giảm khả năng làm việc của kết cấu cũng như sai lệch lắp ghép. Dự đoán sự phân bố ứng suất dư và biến dạng hàn là một nhiệm vụ vô cùng quan trọng ngay từ khi thiết kế ban đầu và chế tạo sản phẩm. Bài báo này tác giả sử dụng phần mềm SYSWELD[®] để phân tích và dự đoán sự phân bố ứng suất dư và biến dạng khi hàn nối hai ống thép không gỉ 316L bằng phương pháp hàn điện cực không nóng chảy trong môi trường khí bảo vệ (GTAW) với đường kính ống 102mm, chiều dày 3mm.

Abstract

Keywords:

Distortions; Numerical simulation; GTAW process; 316L stainless steel; Residual stresses.

Nowadays, stainless steel is widely used in manufacturing medical instruments and devices; pipelines, heat-resistant and corrosion-resistant tanks... Welding technology is being increasingly used in the manufacturing of products. During welding, heat is generated to melt base metal and filler wire (if any) to form a local weld. This leads to the formation of residual stresses and distortion which reduces the capacity of the structure as well as creating the assembly deviation. To predict the distribution of residual stress and distortion is a very important task from the initial design and manufacture of the product. This article uses SYSWELD[®] software to analyze and predict the residual stress and distortion when welding two 316L stainless steel pipes during Gas Tungsten Inert Welding (GTAW) with a diameter of 102mm and a thickness of 3mm.

Ngày nhận bài: 19/7/2018

Ngày nhận bài sửa: 03/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. GIỚI THIỆU

Thép không gỉ 316L là loại vật liệu có thể làm việc trong môi trường chịu ăn mòn hóa học, chịu nhiệt độ cao. Đây là loại vật liệu có hàm lượng các bon thấp hơn và không phải xử lý nhiệt sau hàn so với thép không gỉ 316. Do đó thường được sử dụng để làm thùng, bồn bể chứa, đường ống dẫn hóa chất...

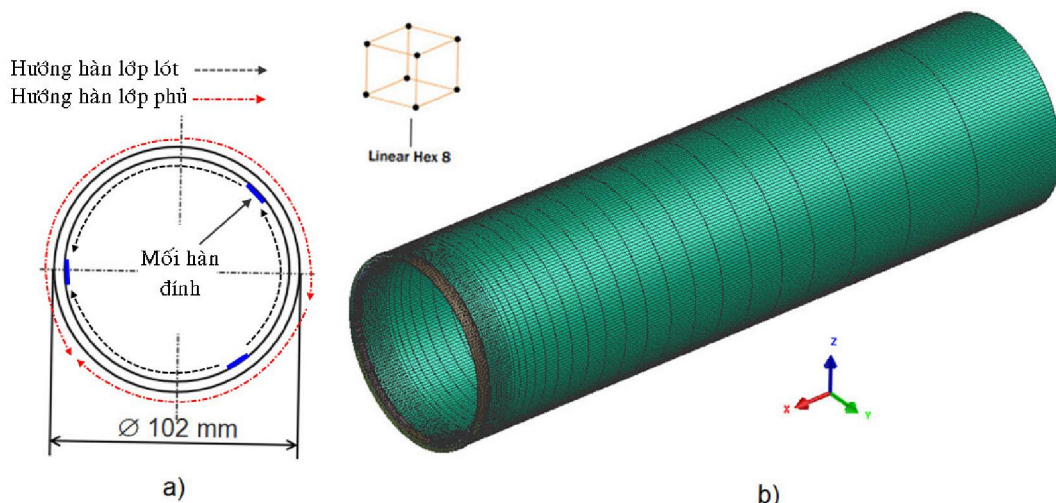
Hàn là một công nghệ nối các vật liệu có thể cùng hoặc khác chủng loại lại với nhau không tháo rời, được sử dụng rộng rãi trong tất cả các ngành công nghiệp như: đóng tàu, xây dựng dân dụng, chế tạo các kết cấu xa bờ, cầu đường, hàng không, bồn bể chứa chịu áp lực... Khi hàn do nung nóng và làm nguội không đều, cùng với ảnh hưởng của thông số chế độ hàn (dòng điện, điện áp, vận tốc hàn,...) và các điều kiện gá kẹp, trình tự hàn... dẫn đến sự xuất hiện ứng suất dư trong bộ phận hoặc toàn kết cấu hàn. Sự xuất hiện ứng suất dư dẫn đến khả năng làm việc của liên kết hàn bị giảm. Biến dạng hàn làm ảnh hưởng tới dung sai lắp ghép. Chính vì vậy, kiểm soát ứng suất dư và biến dạng hàn là vấn đề đang được rất nhiều nhà khoa học trong và ngoài nước quan tâm.

Phân tích và dự đoán sự phân bố trường nhiệt độ, ứng suất dư và biến dạng hàn là một trong những việc làm hết sức quan trọng ngay từ khi thiết kế, chế tạo. Trong những năm gần đây cùng với sự phát triển vượt bậc của ngành khoa học máy tính việc sử dụng kỹ thuật mô phỏng số dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để phân tích, đánh giá, dự đoán sự phân bố ứng suất dư và biến dạng hàn đã và đang được nhiều công ty, tập đoàn lớn áp dụng.

Bài báo này tác giả sử dụng phần mềm SYSWELD[®] [3] để phân tích, dự đoán sự phân bố trường nhiệt độ, ứng suất dư và biến dạng khi hàn đối đầu ống thép không gỉ 316L có đường kính ống 102mm, chiều dày 3mm bằng phương pháp hàn GTAW.

2. KỸ THUẬT MÔ PHỎNG

2.1. Mô hình hóa liên kết hàn



Hình 1. Kích thước ống và hướng hàn (a); mô hình và kiểu lưới 3D (b)

Mô hình ống sử dụng trong mô phỏng có đường kính 102mm, chiều dày 3mm, chiều dài mỗi ống là 350mm như hình 1. Mô hình lưới và kiểu lưới trong phân tích cơ nhiệt được tác giả mô tả như hình 1b.

Trong nghiên cứu của mình, tác giả sử dụng phương pháp hàn GTAW, hàn đỉnh ở 3 vị trí cách đều nhau, hàn 2 lớp, phân đoạn (hình 1a). Mỗi lớp đều hàn 3 đoạn, điểm bắt đầu và kết thúc của mỗi hàn lớp lót và phủ không trùng nhau (hình 1a). Nhiệt độ khi hàn các đường hàn và lớp hàn tiếp theo không lớn hơn 150°C để tránh hiện tượng nứt mỗi hàn. Tổng thời gian mô phỏng là 2500s, thời gian các đường hàn và lớp hàn (gồm thời gian hàn và thời gian làm nguội) là 250s.

2.2. Nguồn nhiệt trong hàn GTAW

Trong bài này, tại bất kỳ thời điểm (t) nào năng lượng của hồ quang hàn được mô tả bằng sự phân bố nguồn nhiệt mặt Gau xơ (Gao và Zhang, 2011), [5, 6]. Vì thế, điểm thuộc bề mặt vật hàn có bán kính của cột hồ quang là r_a sẽ nhận được sự phân bố nhiệt q_t theo công thức (1):

$$q_t = \frac{3Q}{\pi r_a^2} \exp\left[-\left(\frac{r_a}{r_t}\right)^2\right] \quad (1)$$

Trong đó: r_t bán kính của cột hồ quang và P là năng lượng của cột hồ quang $P = \eta \cdot U \cdot I$ (W), trong đó U-là điện áp hồ quang (V); I là cường độ dòng điện hàn (A) và η là hiệu suất hồ quang hàn (0,6 ÷ 0,9). Giá trị thông số chế độ hàn sử dụng trong mô phỏng được cho trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số chế độ mô phỏng hàn và nguồn nhiệt hàn theo Goldak

Đường hàn/ lớp hàn	Năng lượng đường, Q (J/mm)				Kích thước nguồn nhiệt hàn			
	Chế độ hàn 1	Chế độ hàn 2	Chế độ hàn 3	Vận tốc hàn (mm/s)	b (mm)	c (mm)	a_t (mm)	a_r (mm)
Lớp lót	400	450	500	3,0	4	3	5	7
Lớp phủ	500	600	650	3,0	4	3	5	7

2.3. Phương trình truyền nhiệt

Trong công thức 2 là mô hình truyền nhiệt theo 3 chiều (3D) ở trạng thái giả ổn định. Công thức 3 mô tả sự mất nhiệt do trao đổi và bức xạ nhiệt ra môi trường xung quanh, [6].

$$k \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + k \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + k \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} + k \frac{\delta Q}{\delta x^2} = \rho C k \frac{\delta T}{\delta t} \quad (2)$$

$$h(T - T_0) + \beta \epsilon (T^4 - T_0^4) = q_s \quad (3)$$

Trong đó: Q là năng lượng nhiệt toả ra hoặc năng lượng đường (J/mm), q_s là nhiệt lượng thất thoát, T là nhiệt độ khảo sát, T_0 là nhiệt độ ban đầu, t là thời gian (s), k là hệ số dẫn nhiệt (W/mm°C), ρ là khối lượng riêng, C là nhiệt dung riêng (J/g°C), h là hệ số nhiệt đối lưu, β là hằng số Stefan-Boltzman, [5] và ϵ là hệ số phát xạ. Liên quan đến trạng thái giả ổn định, công thức 2 có thể được viết lại như sau:

$$k \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + k \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + k \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} - v_h \frac{\delta Q}{\delta x^2} = -v_h \rho C \frac{\delta T}{\delta t} \quad (4)$$

Trong đó: v_h (mm/s) là vận tốc hàn.

2.4. Phương trình biến dạng

Trong quá trình mô phỏng biến dạng nhiệt của kết cấu hàn, sự biến thiên nhiệt độ tại mỗi nút lưới được định nghĩa như một dạng tải nhiệt đặt vào nút lưới đó. Ứng suất nhiệt hình thành

trong vật hàn được xác định trên cơ sở các ứng suất thành phần theo 3 chiều (x, y, z) như công thức (5).

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (5)$$

Đối với phân tích biến dạng mô hình phần tử hữu hạn phù hợp nhất là hexa 8 nút (hình 1b). Trong quá trình hàn thép không gỉ chuyển biến pha ở trạng thái rắn không xuất hiện đối với kim loại cơ bản và kim loại mối hàn. Vì thế biến dạng tổng (ε) được xác định theo công thức (6).

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{th} \quad (6)$$

Trong đó: biến dạng đàn hồi (ε^e), biến dạng dẻo (ε^p) và biến dạng nhiệt (ε^{th}).

Biến dạng đàn hồi được mô hình hoá theo định luật Hook. [6] với nhiệt độ phụ thuộc vào mô đun đàn hồi Young (hình 2b) và hệ số Poisson (bảng 3). Đối với biến dạng dẻo của mô hình với tốc độ chảy dẻo phụ thuộc vào nhiệt độ, cơ tính của vật liệu và động lực học vật liệu.

2.5. Các thông số của vật liệu

Thành phần hoá học và cơ tính của thép 316L được thể hiện trong bảng 2 và 3. Để đơn giản hoá việc tính toán và mô phỏng số trường nhiệt độ, ứng suất dư và biến dạng ta coi vật liệu có tính liên tục và đẳng hướng.

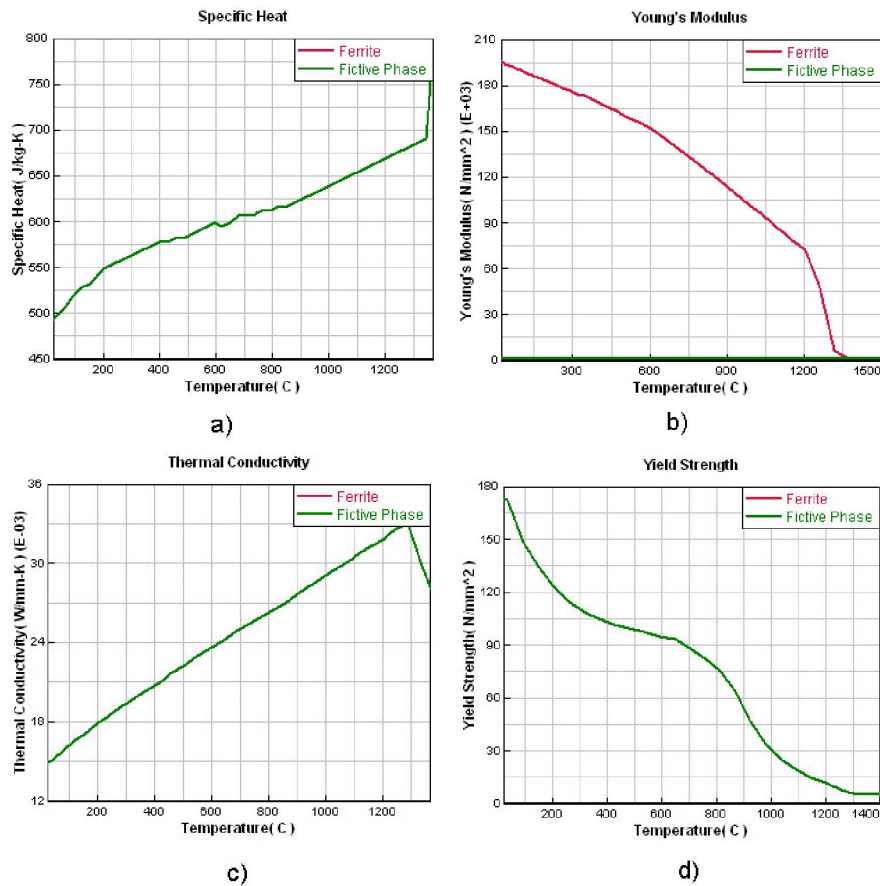
Bảng 2. Thành phần hoá học của thép 316L

Nguyên tố	Hàm lượng, %
C	0,03
Mn	2,0 max
Si	0,75
Cr	16÷18
S	0,03 max
P	0,045 max
Ni	10÷14
Mo	2,0÷3,0

Bảng 3. Tính chất vật lý của thép 316L

Đặc tính	Giá trị
Mô đun đàn hồi (MPa)	193×10^3
Giới hạn bền kéo (MPa)	485
Giới hạn chảy (MPa)	170
Nhiệt độ nóng chảy (°C)	1400
Hệ số Poisson	0,265

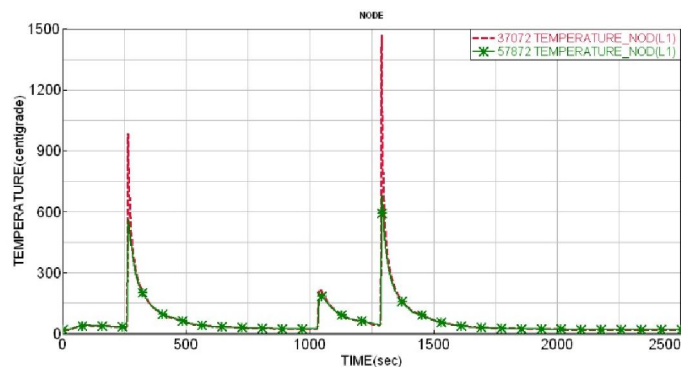
Hình 2 mô tả tính chất cơ - lý - hóa - kim loại học của thép 316L theo nhiệt độ [3]. Hình 2a mô tả nhiệt dung riêng; hình 2b mô tả modul Young; hình 2c mô tả hệ số dẫn nhiệt và hình 2d mô tả giới hạn chảy của thép 316L. Thấy rằng giới hạn chảy của thép 316L ở nhiệt độ khảo sát khoảng 170 MPa, giảm dần khi nhiệt độ tăng và đạt giá trị khoảng 5 MPa tại nhiệt độ nóng chảy.



Hình 2. Tính chất cơ-lý-hóa của thép 316L

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Trường nhiệt độ



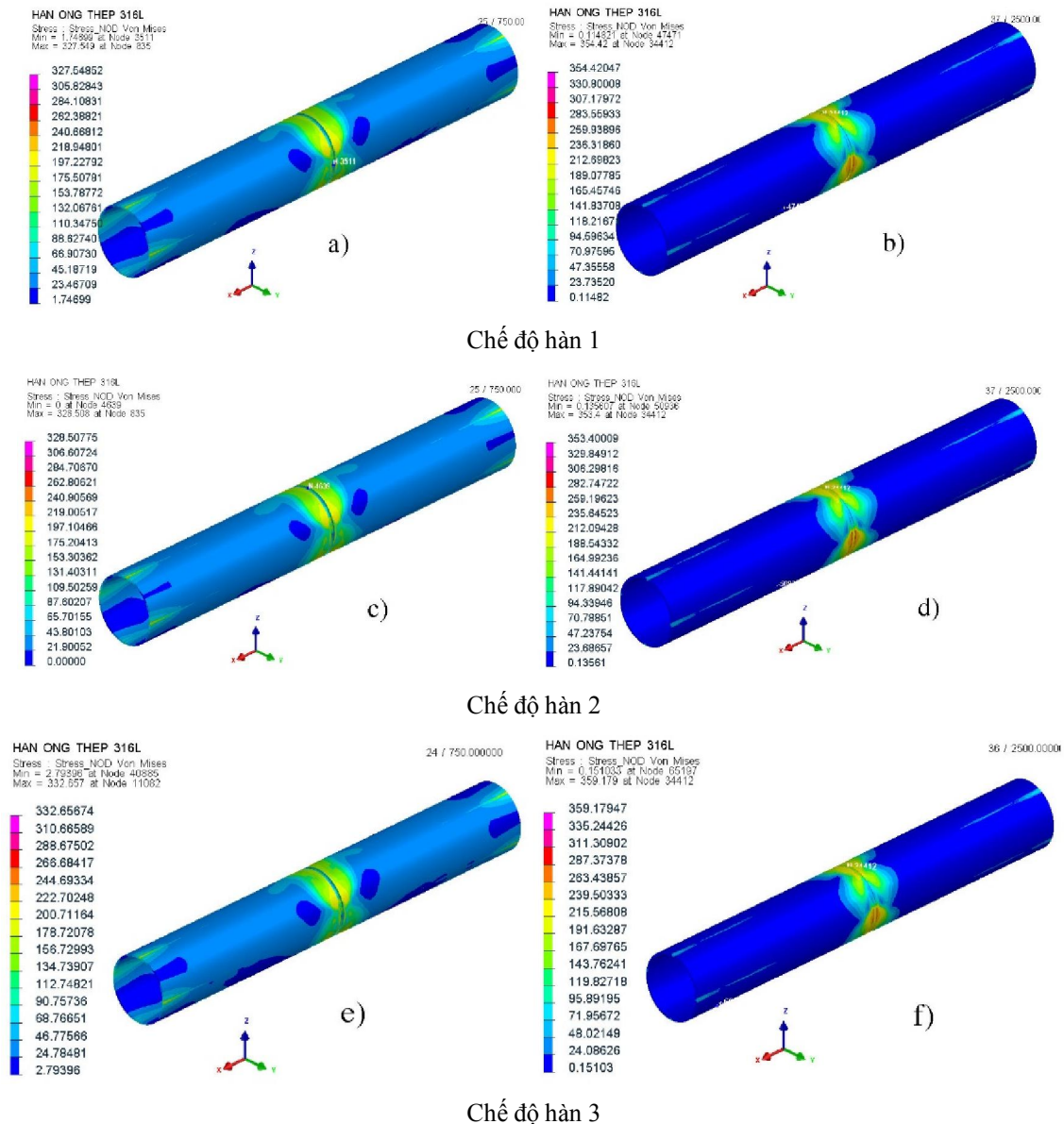
Hình 3. Chu trình nhiệt tại nút 37072 và 57872

Hình 3 mô tả sự biến thiên nhiệt độ tại nút 37072 (đường màu đỏ) nằm tại chân mỗi hàn và nút 57872 thuộc vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) cách chân mỗi hàn 5 mm (đường màu xanh) ta thấy rằng hai nút này đều chịu ảnh hưởng nhiệt khi hàn lớp lót. Tại nút 37072 khi hàn lớp lót do gần tâm nguồn nhiệt nên có nhiệt độ cao hơn (khoảng 1000°C), còn nút 57872 do nằm xa nguồn

nhật nên nhiệt độ tại nút này vào khoảng 600°C . Khi hàn lớp phủ khi nguồn nhiệt đi qua nút 37072 và làm nóng chảy kim loại cơ bản nên nút này có nhiệt độ cao (gần 1500°C) còn nút 57872 cách xa nguồn nhiệt (nhưng gần hơn so với hàn lớp lót) nên nhiệt độ đạt đến 720°C .

3.2. Trường ứng suất

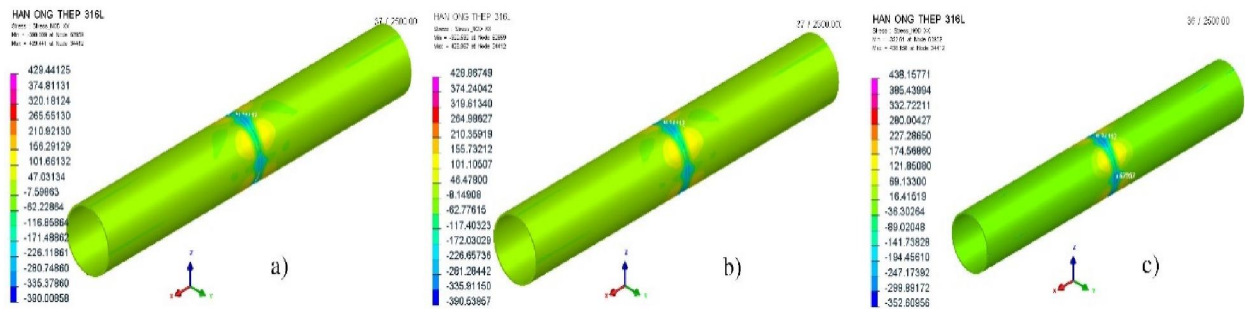
3.2.1. Ứng suất Von mises



Hình 4. Phân bố ứng suất dư Von mises

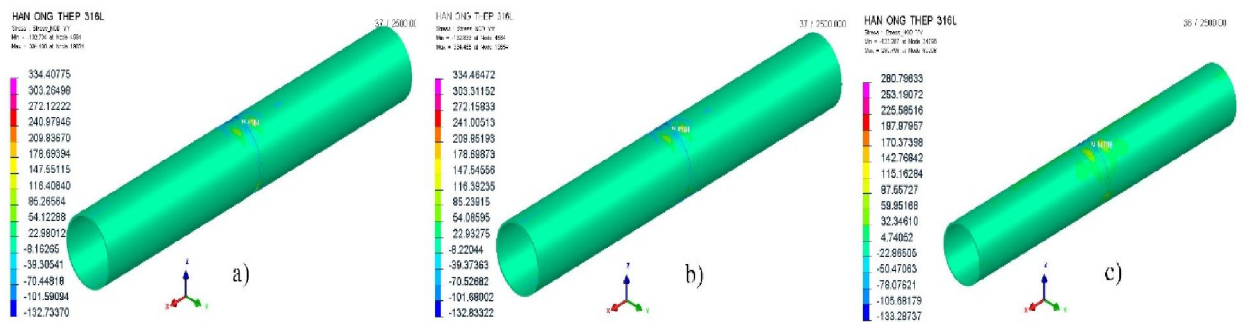
Hình 4 mô tả sự phân bố ứng suất dư tương đương (Von mises) khi hàn với 3 chế độ hàn theo bảng 1. Hình 4 (a, c, e) mô tả sự phân bố ứng suất dư khi hàn mỗi hàn đỉnh và hàn lớp lót. Hình 4 (b, d, f) mô tả sự phân bố ứng suất dư khi hàn mỗi hàn phủ. Ta thấy rằng ứng suất dư tương đương cả 3 chế độ hàn chênh lệch nhau không đáng kể.

3.2.2. Ứng suất dư pháp tuyến



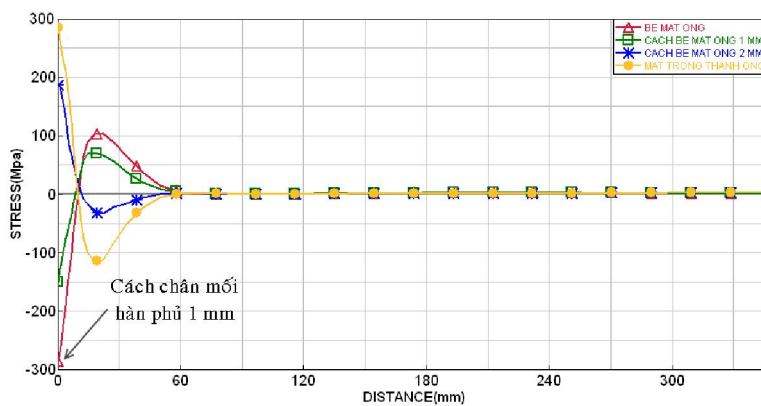
Hình 5. Phân bố ứng suất dư pháp tuyến theo phương X

Hình 5 mô tả sự phân bố ứng suất dư pháp tuyến theo phương X ở nhiệt độ môi trường (20°C). Trên hình ảnh cho thấy khi hàn với chế độ hàn lớn (chế độ hàn 3) ứng suất dư kéo có giá trị lớn hơn (438,16 MPa), ứng suất dư nén có giá trị nhỏ hơn (352,61 MPa) 2 trường hợp còn lại.



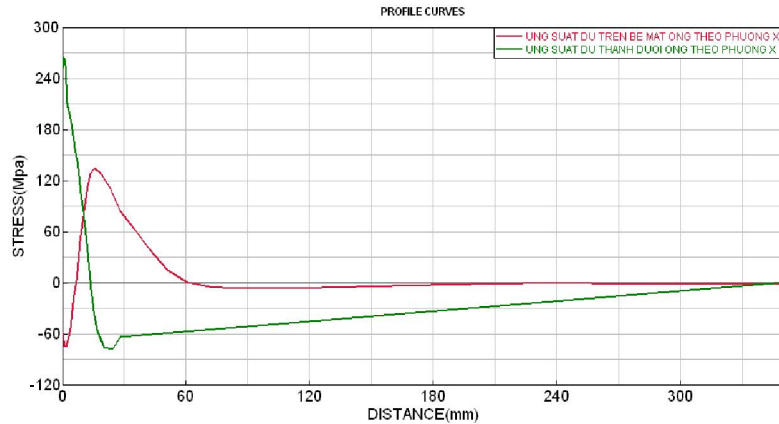
Hình 6. Phân bố ứng suất dư pháp tuyến theo phương Y

Hình 6 mô tả sự phân bố ứng suất dư pháp tuyến theo phương Y ở nhiệt độ môi trường (20°C). Trên hình ảnh cho thấy khi hàn với chế độ hàn lớn (chế độ hàn 3) ứng suất dư kéo có giá trị nhỏ hơn (280,77 MPa), ứng suất dư nén có giá trị giống 2 trường hợp còn lại. Với chế độ hàn 1 và 2 ứng suất dư kéo và ứng suất dư nén có giá trị như nhau.



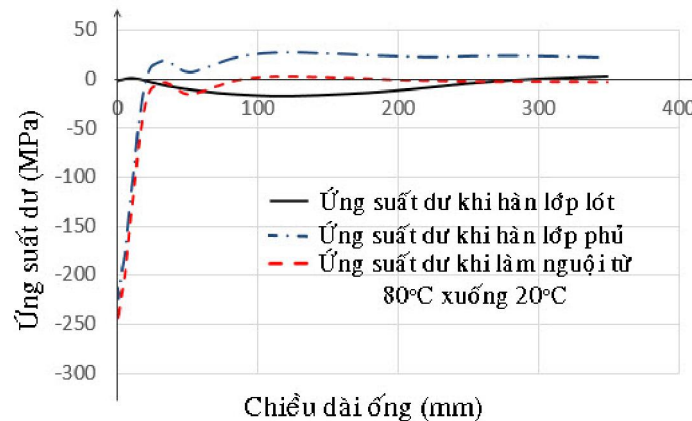
Hình 7. Sự phân bố ứng suất dư pháp tuyến dọc theo ống theo chiều dày thành ống

Trên hình 7 mô tả sự phân bố ứng suất dư pháp tuyến theo phương X, theo chiều dày thành ống. Ta thấy rằng ứng suất dư trên bề mặt ống là ứng suất nén có giá trị gần 300 MPa, ứng suất bắt đầu đổi chiều thành ứng suất dư kéo tại vị trí cách chân mỗi hàn phủ 11 mm và cách chân mỗi hàn khoảng 60 mm cho đến hết chiều dài ống ứng suất dư bằng 0.



Hình 8. Sự phân bố ứng suất dư pháp tuyến trên bề mặt và thành dưới ống

Hình 8 thể hiện sự phân bố ứng suất dư dọc ống (1 nửa mô hình). Đường màu đỏ mô tả sự phân bố ứng suất dư trên bề mặt ống và đường màu xanh thể hiện sự phân bố ứng suất dư trong lòng ống tại cùng mặt cắt ngang. Ta thấy rằng, trên mặt ống tại chân mỗi hàn xuất hiện ứng suất dư nén có chiều rộng khoảng 8 mm và ứng suất dư kéo phần tiếp theo. Theo đó ứng suất dư kéo đạt giá trị đỉnh 135 MPa cách chân mỗi hàn khoảng 20 mm, sau đó giảm dần và bằng 0 ở vị trí cách chân mỗi hàn 60 mm.



Hình 9. Sự phân bố ứng suất dư pháp tuyến trên bề mặt và thành dưới ống

Hình 9 mô tả sự phân bố ứng suất dư thay đổi theo nhiệt độ khi hàn. Trên đồ thị đường liên màu đen biểu diễn sự phân bố ứng suất dư khi hàn xong lớp lót, ở vùng lân cận mỗi hàn ứng suất dư là kéo và vùng xa là ứng suất nén. Khi hàn xong lớp phủ nhiệt độ vật hàn khoảng 80°C ứng suất dư đảo chiều (gần mỗi hàn là ứng suất nén có giá trị đỉnh khoảng 230 MPa, xa là ứng suất kéo có giá trị khoảng 30 MPa). Sau đó vật hàn được làm nguội xuống nhiệt độ môi trường (20°C), lúc này ứng suất dư không đảo chiều nữa mà ứng suất dư kéo giảm xuống gần bằng 0.

4. KẾT LUẬN

Bằng phương pháp mô phỏng số khi hàn đối đầu ống thép không gỉ 316L đường kính ngoài 102mm, chiều dày 3mm tác giả đã phân tích, đánh giá và dự đoán được:

- Sự phân bố nhiệt độ khi hàn thép không gỉ bằng phương pháp hàn GTAW. Đây chính là cơ sở dữ liệu để phân tích ứng suất và biến dạng hàn sau này.

- Qua kết quả thu nhận được về sự phân bố ứng suất dư ta có thể đưa ra các biện pháp làm giảm ứng suất và biến dạng hàn.

- Ứng suất dư pháp tuyến vuông góc với đường hàn luôn lớn hơn ứng suất dư pháp tuyến song song với đường hàn.

- Ứng suất dư trên bề mặt và dưới thành ống thay đổi từ nén sang kéo và từ trên bề mặt xuống dưới thành ống.

- Giá trị ứng suất dư tăng khi chế độ hàn tăng.

- Ứng suất dư thay đổi theo nhiệt độ và số lớp hàn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. B. Brickstad, B.L. Josefson, A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes, International Journal of Pressure Vessels and Piping 75, 1998, p. 11-25.

[2]. Jeffrey Packer, Steel Design Guide (AISC), 2010.

[3]. ESI Group, 99 Rue Des, Solets Silic 112 94513 Rungis Cedex FRANCE.

[4]. Zienkiewicz, O. C, The Finite Element Method, McGraw-Hill Company, London, 1977.

[5]. J. Goldak, M. Bibby, J. Moore and B. Patel, Computer Modling of Heat Flow in Welds, 1996s.

[6]. Nguyen, N.T., Ohta, A., Matsuoka, K., Suzuki, N., and Maeda, Y. (1999). Analytical solutions for transient temperature of semi-infinite body subjected to 3-D moving heat sources. Welding Journal Research Supplement, August, 265-274.