

**PHÂN BỐ ỨNG SUẤT DƯ VÀ BIẾN DẠNG
KHI HÀN GIÁP MỐI HAI TẤM THÉP KHÔNG GỈ AISI 304**
RESIDUAL STRESS AND DISTORTION DISTRIBUTION IN BUTT
WELDED JOINT OF TWO AISI 304 STAINLESS STEEL PLATES

Hoàng Trọng Ánh¹, Nguyễn Hồng Thanh¹, Hà Xuân Hùng², Nguyễn Tiến Dương³

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định, Việt Nam

²Trường Đại học Lao động và Xã hội, Việt Nam

³ Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 18/7/2017, ngày phản biện đánh giá 9/8/2017, ngày chấp nhận đăng 10/10/2017.

TÓM TẮT

Thép không gỉ là loại vật liệu được ứng dụng rộng rãi trong chế tạo kết cấu thép, chế tạo máy, đường ống, bồn bể chứa chịu nhiệt, chịu ăn mòn hóa học,... Bài báo này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích và dự đoán sự phân bố ứng suất dư và biến dạng của liên kết hàn giáp mối hai tấm thép không gỉ AISI 304. Khi hai tấm thép được nối với nhau bằng hàn, một chu trình nhiệt phức tạp được cấp vào vật hàn. Kết quả của việc cấp nhiệt là biến dạng trong vùng đàn - dẻo là không thể phục hồi được và làm tăng ứng suất dư trong và xung quanh vùng nóng chảy và vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ). Dự đoán ứng suất dư và biến dạng khi hàn là một nhiệm vụ vô cùng quan trọng ngay từ khi thiết kế và chế tạo. Hơn nữa, việc nghiên cứu này nhằm đưa ra trình tự hàn hợp lý đối với liên kết hàn giáp mối nhằm giảm chi phí, cải thiện khả năng làm việc và tăng khả năng chế tạo của kết cấu hàn.

Từ khóa: AISI 304; Biến dạng hàn; Ứng suất dư; Liên kết hàn giáp mối vát mép chữ X; Trình tự hàn.

ABSTRACT

Stainless steel is a type of material widely used in manufacturing structural steel, machinery, corrosion and temperature resistant pipes and tanks, etc. This paper uses finite element method to analyse and predict the distribution of residual stress and distortion of the butt welded joint between two AISI 304 stainless steel plates. When two plates are joined by welding, a complex thermal cycle is applied to the weldment. Thermal energy applied results in irreversible elastic-plastic deformation and consequently gives rise to the residual stresses in and around fusion zone and heat affected zone (HAZ). The prediction about welding residual stress and distortion is an important task when designing welded structure. Furthermore, this investigation provides a proper butt welding sequence to reduce costs, improve workability and increase fabrication capabilities of the welded structure.

Key words: AISI 304; Welding strain; Residual stress; Butt welded joint with X –groove; Welding sequence.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thép không gỉ AISI 304 [1] là loại vật liệu có thể làm việc trong môi trường chịu ăn mòn hóa học, có độ bền tương đối cao và thường được sử dụng để làm thùng, bồn bể chứa hóa chất,...

Khi hàn do nung nóng và làm nguội không đều kèm theo ảnh hưởng của thông số chế độ hàn và các điều kiện gá kẹp, trình tự hàn,... sẽ dẫn đến sự xuất hiện ứng suất dư và biến dạng hàn trong bộ phận hoặc toàn kết cấu hàn.

Harinadh Vemanaboina và cộng sự đã mô phỏng số trường nhiệt độ và sự phân bố ứng suất dư khi hàn TIG hai tấm thép không gỉ 304. Vijay Gohel và cộng sự nghiên cứu sự phân bố G.Mi và cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của thông số mối ghép đến sự phân bố ứng suất dư khi hàn nhôm tấm bằng phương pháp phân tử hữu hạn,... Thanh và cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của trình tự hàn đến ứng suất dư và biến dạng trong liên kết hàn giáp mối hai tấm thép A36 bằng phương pháp phân tử hữu hạn,...

Phân tích và dự đoán sự phân bố 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.

Bài báo này tác giả sử dụng phần mềm Sysweld[®] của tập đoàn ESI [2] để phân tích, dự đoán sự phân bố ứng suất dư và biến dạng trong liên kết hàn giáp mối hai tấm thép không gỉ AISI 304, vát mép chữ "X" kích thước 140×100×14mm với 6 trình tự hàn.

2. KỸ THUẬT MÔ PHỎNG

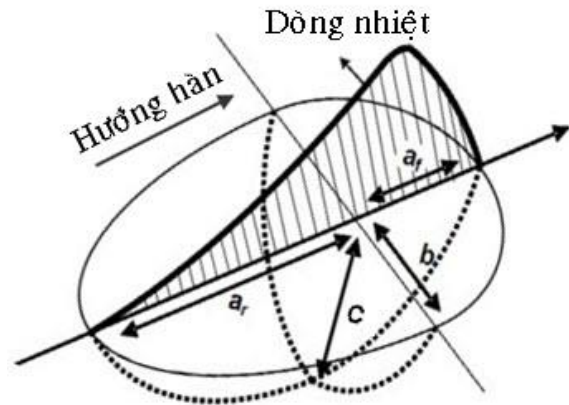
2.1 Mô hình nguồn nhiệt

Sự phân bố nhiệt trong vật hàn chính là nhiệt lượng của cột hồ quang hàn, khả năng dẫn nhiệt của kim loại cơ bản, sự tỏa nhiệt ra môi trường,... Với nguồn nhiệt hàn hồ quang, tổng công suất hiệu dụng

$$Q = \eta \cdot U_h \cdot I_h \quad (W) \quad (1)$$

Trong đó: U_h - là điện áp hồ quang (V); I_h - là cường độ dòng điện hàn (A) và η là hiệu suất hồ quang hàn (0,6÷0,9).

Goldak và cộng sự [3] đã đưa ra mô hình nguồn nhiệt có mật độ phân bố ellipsoid kép được xác định khi kết hợp hai khối bán ellipsoid khác nhau để tạo thành một nguồn nhiệt, hình 1.



Hình 1. Mô hình nguồn nhiệt hàn SMAW

Mật độ nhiệt bên trong từng khối bán ellipsoid được mô tả bằng hai phương trình riêng.

Với một điểm bất kỳ (x,y,z) bên trong khối bán ellipsoid phía trước nguồn nhiệt, mật độ nguồn nhiệt được biểu diễn bởi phương trình 2.

$$Q_R(x, y, z, t) = Q_f \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{a_f^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2}\right) \quad (2)$$

Với một điểm bất kỳ (x,y,z) bên trong khối bán ellipsoid phía sau nguồn nhiệt, mật độ nguồn nhiệt được biểu diễn bởi phương trình 3.

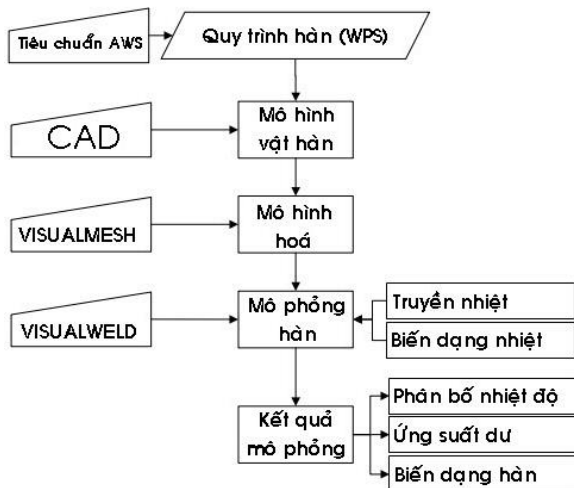
$$Q_R(x, y, z, t) = Q_r \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{a_r^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2}\right) \quad (3)$$

Trong các công thức trên a_f , a_r , b và c là các thông số hình học của nguồn nhiệt khối ellipsoid kép; Q_f và Q_r là khối bán ellipsoid phía trước và phía sau nguồn nhiệt, hình 1; Q_R là hàm mật độ nguồn nhiệt [4].

Bảng 1. Thông số nguồn nhiệt hàn thực nghiệm

Thông số	Giá trị
a_f	6 mm
a_r	10 mm
b	6,5 mm
c	4 mm

Bảng 1 là các thông số nguồn nhiệt hàn thực nghiệm quá trình hàn SMAW.



Hình 2. Trình tự thực hiện mô phỏng

Hình 2 là trình tự thực hiện mô phỏng quá trình hàn giáp mối vát mép chữ X hai tấm thép AISI 304, dày 14 mm. Mô hình vật hàn được mô hình hoá bằng phần mềm VisualMesh [5] và mô phỏng số bằng phần mềm VisualWeld [6]. Kết quả sau khi mô phỏng cho ta trường nhiệt độ, trường ứng suất dư và biến dạng hàn.

2.2 Mô hình truyền nhiệt

Công thức 3 là mô hình truyền nhiệt theo 3 chiều (3D) ở trạng thái giả ổn định. Công thức 4 mô tả sự mất nhiệt do trao đổi và bức xạ nhiệt ra môi trường xung quanh, [7].

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

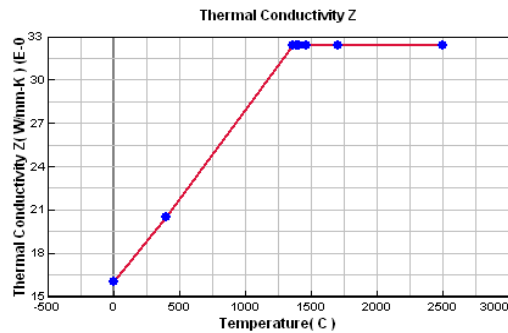
$$h(T - T_0) + \beta \epsilon (T^4 - T_0^4) = q_s \quad (5)$$

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 và ϵ là hệ số phát xạ, [8]. Liên quan đến trạng thái giả ổn định, công thức 2 có thể được viết lại như sau:

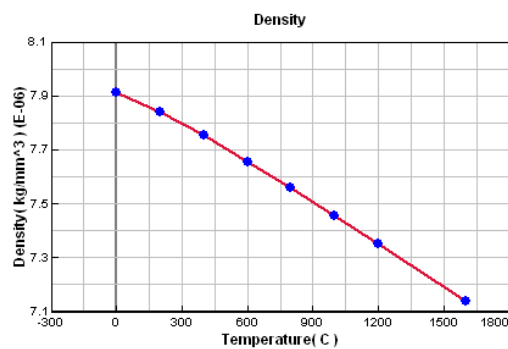
$$k \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + k \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + k \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} - v \frac{\delta Q}{\delta x^2} = -V_h \rho C \frac{\delta T}{\delta t} \quad (6)$$

V_h là vận tốc hàn, (mm/s)

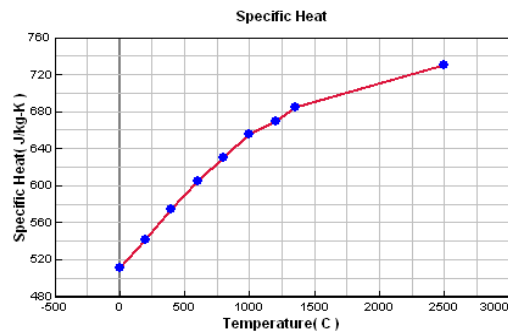
Hình 3, 4, 5, 6 biểu diễn các tính chất cơ – lý – kim loại học của thép AISI 304 [9].



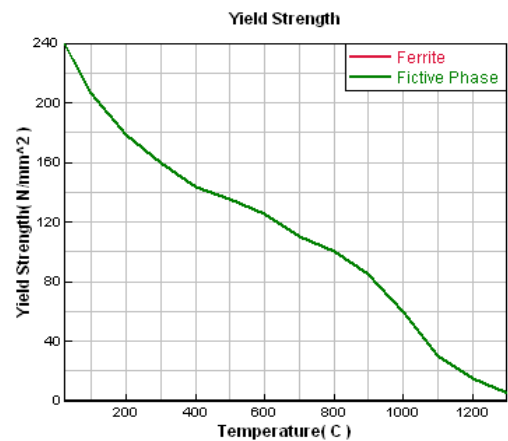
Hình 3. Hệ số dẫn nhiệt của thép AISI 304



Hình 4. Khối lượng riêng của thép AISI 304



Hình 5. Nhiệt dung riêng của thép AISI 304



Hình 6. Giới hạn chảy của thép AISI 304

2.3 Mô hình biên dạng

Trong quá trình mô phỏng biên 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 7.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (7)$$

Biến dạng tổng (ε) gồm: biến dạng đàn hồi (ε^e), biến dạng dẻo (ε^p) và biến dạng nhiệt (ε^{th}) được xác định theo công thức 8.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{th}$$

Biến dạng đàn hồi được mô hình hoá dựa theo định luật Hook [10]. Với loại biến dạng này thì nhiệt độ phụ thuộc vào mô đun đàn hồi Young và hệ số Poisson (bảng 3). Đối với biến dạng dẻo của mô hình thì tốc độ chảy dẻo phụ thuộc vào nhiệt độ, cơ tính của vật liệu và động lực học vật liệu.

2.4 Các thông số của vật liệu

Thành phần hóa học và cơ tính của thép AISI 304 được cho trong bảng 2 và 3. Trong nghiên cứu này tác giả coi vật liệu có tính liên tục và đẳng hướng.

Bảng 2. Thành phần hoá học của thép

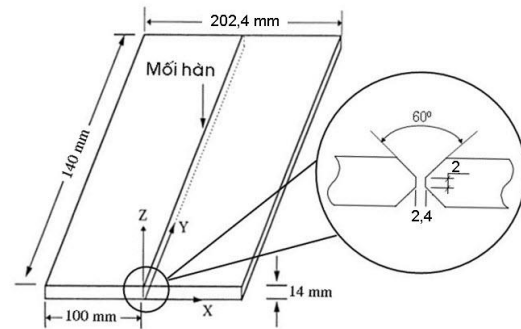
Thành phần hoá học, %						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,08	0,75	2,0	0,04	0,03	18÷19	8÷9

Bảng 3. Tính chất vật lý của thép

Đặc tính	Giá trị
Mô đun đàn hồi (ksi)	29.000
Giới hạn chảy (ksi)	31.200
Hệ số Poisson	0,29
Nhiệt độ nóng chảy (°C)	1455
Nhiệt độ đông đặc (°C)	1400

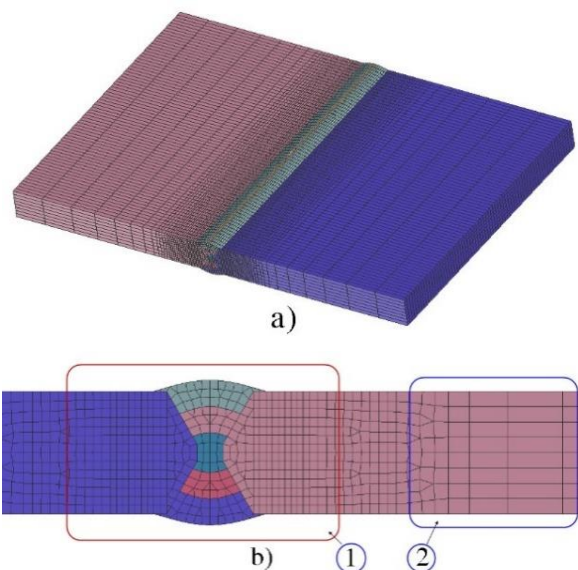
2.5 Mô hình hoá liên kết hàn

Liên kết hàn được thiết kế bằng các phần mềm với mô hình solid (3D), hình 7.



Hình 7. Mô hình liên kết hàn giáp mối

Sau đó liên kết hàn được mô hình hoá bằng phần mềm VisualMesh với 86.812 phần tử và 69.231 nút. Hình 8.a thể hiện mô hình lưới của toàn bộ liên kết. Hình 8.b thể hiện vùng chia lưới ở khu vực mối hàn, vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) và vùng xa mối hàn.

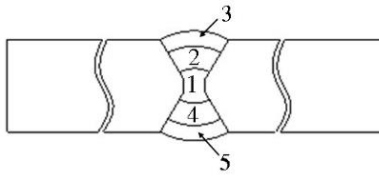


Hình 8. Mô hình hoá liên kết hàn (a); Vùng chia lưới (b)

Để kết quả mô phỏng được chính xác vùng mối hàn và vùng ảnh hưởng nhiệt sẽ được chia lưới mịn hơn (hình 8.b – vùng 1) và vùng lân cận ít chịu tác động bởi nhiệt độ cao sẽ được chia lưới thưa hơn (hình 8.b - vùng 2).

2.6 Trình tự thực hiện các đường hàn

Trong nghiên cứu của mình, tác giả chọn tấm hàn có chiều dày 14 mm, vát mép chữ X và phương pháp hàn SMAW. Để đạt được kích thước mối hàn cũng như chiều sâu ngấu tác giả chọn hàn 5 đường, hình 9.



Hình 9. Bố trí các đường hàn

Thứ tự thực hiện các đường hàn được mô tả trong bảng 4

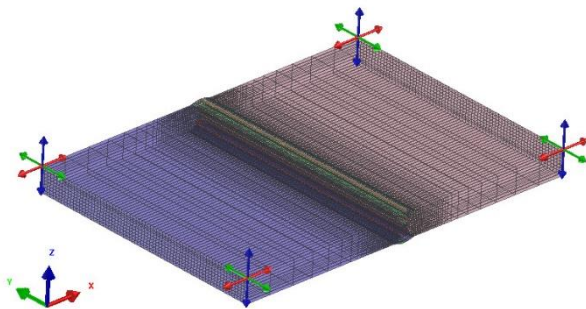
Bảng 4. Thứ tự thực hiện các đường hàn

Trường hợp	Thứ tự các đường hàn	Hướng hàn
1	1, 2, 4, 5, 3	Cùng chiều
2	1, 2, 4, 3, 5	Cùng chiều
3	1, 4, 2, 5, 3	Cùng chiều
4	1, 2, 4, 3, 5	1, 3, 5 cùng chiều
5	1, 4, 2, 5, 3	1, 3, 5 cùng chiều
6	1, 2, 3, 4, 5	Cùng chiều

Tổng thời gian mô phỏng và làm nguội của toàn liên kết là 2000s, sau thời gian này vật hàn được làm nguội xuống nhiệt độ môi trường. Nhiệt độ giữa các lớp hàn nhỏ hơn 150 °C.

2.7 Điều kiện gá kẹp

Điều kiện gá kẹp liên kết hàn được thực hiện giống như trong thực nghiệm. Liên kết hàn được kẹp chặt theo 3 chiều x, y, z trong tất cả các trường hợp, hình 10.



Hình 10. Vị trí gá kẹp khi mô phỏng

2.8 Thông số hàn và mô phỏng

Thông số, chế độ hàn thực nghiệm bằng phương pháp hàn SMAW được mô tả trong bảng 5 [11]. Trong đó: V_h : Vận tốc hàn (mm/s); D_d : Đường kính que hàn (mm). Thông số mô phỏng được cho trong bảng 6.

Bảng 5. Chế độ hàn thực nghiệm

Đường hàn	I_h (A)	U_h (V)	η	V_h (mm/s)	D_d (mm)
1	87,5	29	0,8	3,2	2,5
2	125	32	0,8	3,5	3,2
3	120	30	0,8	3,0	3,2
4	125	32	0,8	3,5	3,2
5	120	30	0,8	3,0	3,2

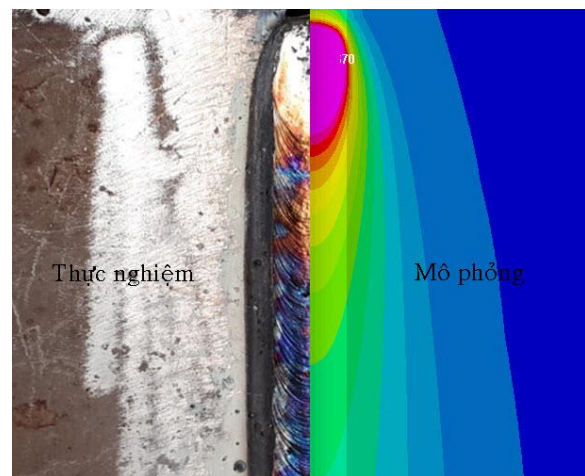
Bảng 6. Thông số mô phỏng

Đường hàn	Năng lượng đường (J/mm)	Vận tốc hàn (mm/s)
1	800	3,5
2	900	3,5
3	940	3,0
4	900	3,5
5	940	3,0

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

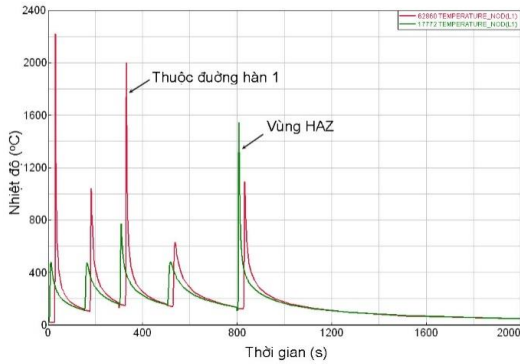
Sau khi mô hình hóa liên kết hàn giúp môi vát mép kiểu chữ “X” ta tiến hành khai báo các thuộc tính của vật liệu, công suất nguồn nhiệt, thiết lập các điều kiện tính toán, điều kiện gá kẹp chặt. Giải bài toán ta thu được kết quả:

3.1 Trường nhiệt độ



Hình 11. So sánh kích thước bề hàn giữa mô phỏng và thực nghiệm

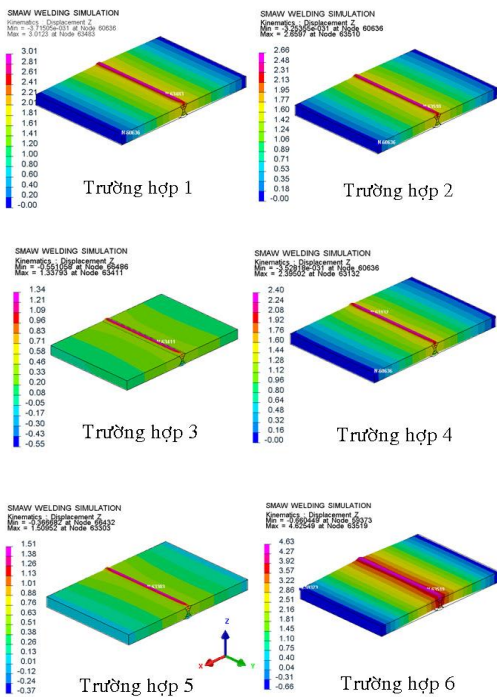
Hình 11 thể hiện kích thước bề hàn nóng chảy, vùng HAZ giữa mô phỏng và thực nghiệm. Ta nhận thấy chúng có hình dạng gần giống nhau. Như vậy kết quả mô phỏng có thể chấp nhận được và là cơ sở để giải bài toán cơ nhằm xác định ứng suất dư và biến dạng hàn của toàn liên kết.



Hình 12. Chu trình nhiệt hàn

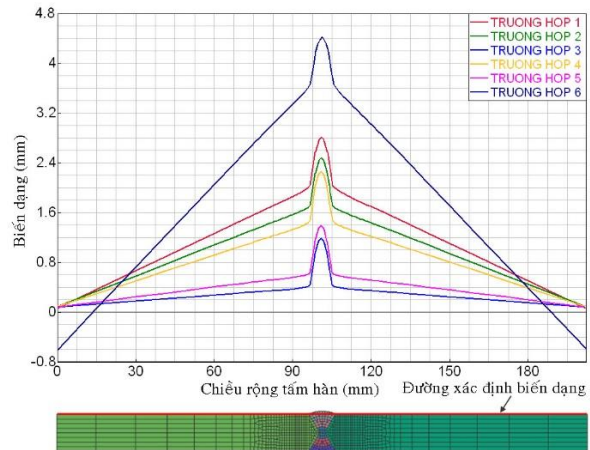
Hình 12 biểu diễn chu trình nhiệt hàn tại nút 62.860 thuộc đường hàn 1 và nút 17.772 thuộc vùng ảnh hưởng nhiệt cách chân đường hàn phủ, trên mặt tấm thép khoảng 3,5 mm. Ta thấy rằng đường hàn 1 chịu sự ảnh hưởng của nhiệt độ cao khi hàn các đường còn lại. Đây cũng chính là nguyên nhân dẫn đến sự thay đổi tổ chức tế vi và sự tập trung ứng suất dư.

3.2 Trường biến dạng



Hình 13. Biến dạng theo phương Z

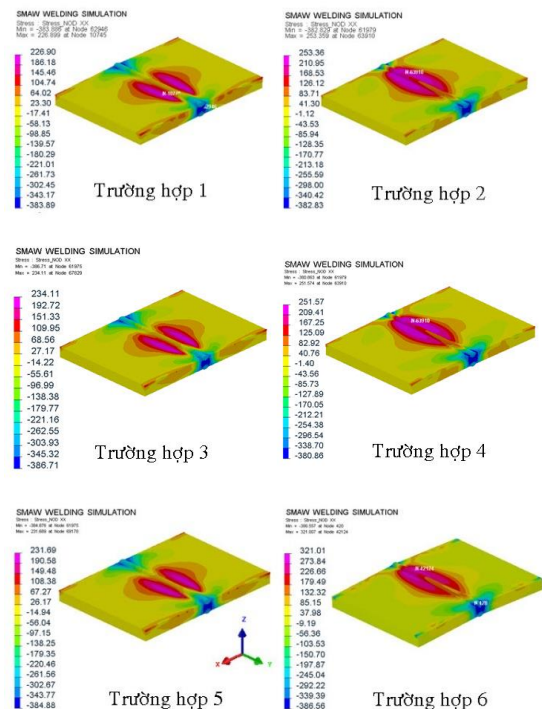
Hình 13 thể hiện biến dạng toàn liên kết hàn theo phương Z của 6 trường hợp. Ta thấy rằng trường hợp 3 cho kết quả biến dạng nhỏ nhất và trường hợp 6 cho kết quả biến dạng lớn nhất và vùng biến dạng là tương đối rộng.



Hình 14. Biến dạng góc theo Z

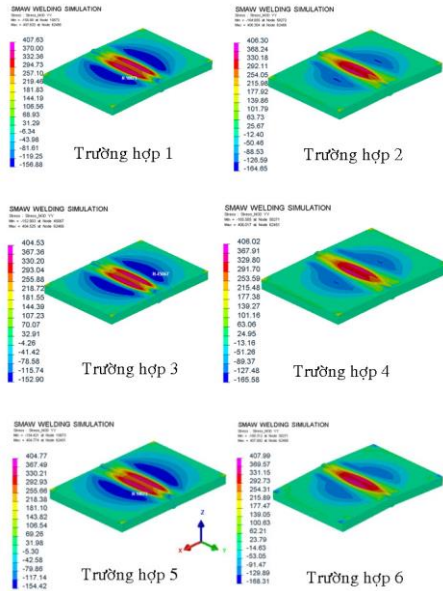
Hình 14 thể hiện biến dạng góc của 6 trường hợp như đã nêu ở trên. Vị trí đường lấy biến dạng cách đầu đường hàn 50 mm và phía trên tấm thép. Ta thấy rằng, với điều kiện kẹp chặt (hình 10) biến dạng tập trung lớn nhất nằm ở khu vực mỗi hàn.

3.3 Trường ứng suất



Hình 15. Ứng suất pháp theo phương X

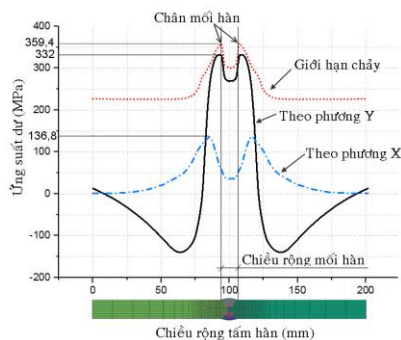
Hình 15 mô tả sự phân bố ứng suất dư pháp tuyến theo phương X (vuông góc với đường hàn) của 6 trường hợp. Theo đó, ứng suất dư khi hàn trong trường hợp 1 là nhỏ nhất, lớn nhất khi hàn với trường hợp 6.



Hình 16. Ứng suất pháp theo phương Y

Hình 16 là sự phân bố ứng suất pháp theo phương Y (dọc trục đường hàn) của 6 trường hợp hàn nói trên. Dựa vào kết quả tính toán và mô phỏng ta thấy rằng ứng suất dư trong tất cả các trường hợp này có thể coi là giống nhau.

Hình 17 thể hiện sự phân bố ứng suất dư pháp tuyến (theo phương X và Y) và giới hạn chảy của kim loại cơ bản và kim loại mối hàn tại khu vực khảo sát (Vị trí đường lấy ứng suất dư cách đầu đường hàn 50 mm trên bề mặt tấm thép, theo chiều rộng của mẫu hàn) thuộc trường hợp 1.



Hình 17. So sánh giới hạn chảy và ứng suất dư pháp tuyến

Bảng 7. So sánh kết quả ứng suất dư và giới hạn chảy

Ứng suất dư (MPa)	Giới hạn chảy (MPa)	Tỷ lệ (%)
136,8	359,4	38,1
332,0	359,4	92,4

Dựa vào kết quả so sánh ta thấy ứng suất dư pháp tuyến theo phương X và Y lần lượt bằng 38,1 và 92,4% so với giới hạn chảy của vật liệu tại khu vực khảo sát. Điều đó chứng tỏ rằng liên kết hàn vẫn đảm bảo điều kiện bền.

4. KẾT LUẬN

Dựa vào việc phân tích, đánh giá ứng suất và biến dạng khi hàn 2 tấm thép không gỉ AISI 304 có chiều dày 14 mm, vát mép chữ X sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn tác giả đã:

1. Tính toán, phân tích và dự đoán được ảnh hưởng của trình tự hàn đến sự phân bố ứng suất dư và biến dạng hàn;
2. Hàn với trường hợp 1 thì ứng suất dư là nhỏ nhất (226,90 MPa) và trường hợp 6 cho ứng suất dư lớn nhất (321,01 MPa);
3. Hàn với trường hợp 3 biến dạng hàn là nhỏ nhất (1,34 mm) và lớn nhất khi hàn với trường hợp 6 (4,63 mm).

Với kết quả nghiên cứu đã đạt được, tác giả mong muốn đây là những thông tin hữu ích cho các cơ sở sản xuất, chế tạo vật liệu liên quan đến thép không gỉ, đặc biệt là thép AISI 304 có thể ứng dụng vào thực tế sản xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Tiến Dương, Mô phỏng quá trình truyền nhiệt khi hàn, Hà Nội, 2008
- [2] Nguyễn Thế Ninh, *Phân tích truyền nhiệt hàn và ứng dụng*, NXB Bách khoa Hà Nội, 2011
- [3] Trần Văn Địch, *Sổ tay thép thế giới*, NXB Khoa học kỹ thuật Hà Nội, 2004.
- [4] Nguyễn Hồng Thanh, Hoàng Trọng Ánh, Nguyễn Tiến Dương, Hà Xuân Hùng, *Dự đoán ứng suất dư và biến dạng liên kết hàn góc chữ T bằng phương pháp phần tử hữu hạn*, Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật, số 37, 9/2016.
- [5] Nguyễn Hồng Thanh, Hoàng Trọng Ánh, Hà Xuân Hùng, Nguyễn Tiến Dương, *Nghiên cứu ảnh hưởng của trình tự hàn đến ứng suất dư và biến dạng trong liên kết hàn giáp mối*, Hội nghị KH & CN toàn quốc về cơ khí – động lực, Đại học Bách khoa Hà Nội, 10/2016.
- [6] Nguyễn Hồng Thanh, Nguyễn Tiến Dương, Hà Xuân Hùng, *Ảnh hưởng của trình tự hàn đến sự phân bố ứng suất dư trong liên kết hàn ống chữ K*, Hội nghị Khoa học toàn quốc lần thứ 2 về Cơ kỹ thuật và Tự động hóa, Đại học Bách khoa Hà Nội, 10/2016.
- [7] Zienkiewicz, O. C, *The Finite Element Method*, McGraw-Hill Company, London, 1977.
- [8] Nguyen, N.T., Ohta, A., Matsuoka, K., Suzuki, N., and Maeda, Y. Analytical solutions for transient temperature of semi-infinite body subjected to 3-D moving heat sources. *Welding Journal Research Supplement*, August, 265-274, 1999.
- [9] Goldak, J., Chakravarti, A., and Bibby, M. *A new finite element model for welding heat source*. *Metallurgical Transactions B*, 15B, 299-305, 1984.
- [10] ESI Group, 99 Rue Des, Solets Silic 112 94513 Rungis Cedex FRANCE.
- [11] AWS D1.1 2010, Structural Welding Code – Steel, An American National Standard, 2010.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Nguyễn Hồng Thanh

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định, Việt Nam

Email: thanh.we@gmail.com