

**DỰ ĐOÁN ỨNG SUẤT DƯ VÀ BIẾN DẠNG LIÊN KẾT HÀN
GÓC CHỮ T BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN**
PREDICTION OF WELDING DISTORTIONS AND RESIDUAL STRESSES
IN T JOINT FILLET WELDS BY FINITE ELEMENT METHOD

**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 và Xã hội

Ngày tòa soạn nhận bài 5/7/2016, ngày phản biện đánh giá 25/7/2016, ngày chấp nhận đăng 20/8/2016

TÓM TẮT

Liên kết hàn góc được sử dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp đóng tàu thủy, công nghiệp ô tô và chế tạo kết cấu thép,... Tuy nhiên, trong hàn thường xuất hiện ứng suất dư và biến dạng do hiện tượng nung nóng và làm nguội không đều. Đây chính là nguyên nhân ảnh hưởng trực tiếp đến độ bền và tuổi thọ làm việc của kết cấu hàn. Ngày nay, mô phỏng số dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn được coi là một công cụ rất hữu ích trong việc dự đoán trường ứng suất dư và biến dạng trong hàn ngay từ khi thiết kế sản phẩm. Bài báo này tác giả sử dụng gói phần mềm VISUAL ENVIRONMENT của tập đoàn ESI để mô hình hoá và mô phỏng số trường ứng suất dư và biến dạng của liên kết hàn góc kiểu chữ T hai tấm thép các bon thấp, kích thước: tấm đế 310mm×200mm×5mm và tấm vách 310mm×100mm×5mm, hàn 2 phía bằng phương pháp hàn GMAW. Thông qua mô phỏng ta nhận thấy khi liên kết chữ T bị ngàm chặt theo 3 chiều (x, y, z) ở cả tấm đế và tấm vách cho ta biến dạng là nhỏ nhất. Đồng thời, nếu thực hiện hàn 2 phía cùng lúc sẽ cho ta ứng suất dư là nhỏ nhất và có sự phân bố ứng suất không đều khi hàn cùng chiều và ngược chiều nhau.

Từ khoá: Mô phỏng số; Liên kết hàn góc chữ T; Ứng suất dư; Biến dạng hàn; Quá trình hàn GMAW.

ABSTRACT

Fillet welds are widely used in ship building industry, automotive industry and steel structure manufacturing,... However, there exist welding distortions and residual stresses because of uneven heating and cooling. This is a factor affecting the reliability and lifetime of the welding joint. Nowadays, numerical simulation by finite element method is considered a useful tool to predict the welding deformation and residual stress right on designing. In this paper, the authors apply the software VISUAL ENVIRONMENT by ESI to modelize and simulate the welding deformation and residual stress of a T- fillet welds joint with two plates of S355J2G3 carbon steel material: the flange with the size of 310mm×200mm×5mm and the web with the size of 310mm×100mm×5mm by GMA welding. On the basis of simulation, it can be seen that when the T joint is tightly clamped by 3 directions (x, y, z) both in the flange and the web shows the minimum deformation. Simultaneously, if it is welded from two sides,

the residual stress will be the minimum and there is an uneven stress distribution when it is welded in the same direction or in the opposite one.

Key words: *Numerical simulation; T-joint fillet weld; Residual stresses; Distortion; GMA welding process.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Liên kết hàn góc được sử dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp đóng tàu thủy, công nghiệp ô tô và chế tạo kết cấu thép. Liên kết hàn góc thường chịu biến dạng như: biến dạng dọc, co ngang và đặc biệt là biến dạng góc. Do sự nung nóng và làm nguội không đều của quá trình hàn dẫn đến hiện tượng tập trung ứng suất dư và biến dạng trong hàn. Khi vật hàn bị biến dạng vượt quá ngưỡng cho phép sẽ làm cho kết cấu sai lệch về kích thước lắp ghép. Đồng thời làm giảm khả năng làm việc cũng như tuổi thọ của liên kết hàn. Chính vì vậy, sử dụng các biện pháp trong hàn như: xử lý nhiệt sau hàn, nung nóng cục bộ (sử dụng ngọn lửa hàn), rung giảm ứng suất, nắn nóng và nắn nguội đã được áp dụng một cách triệt để nhằm làm giảm biến dạng và ứng suất dư. Tuy nhiên, giá thành các phương pháp trên tương đối tốn kém và mất khá nhiều thời gian, đôi khi khó thực hiện đối với các kết cấu lớn và phức tạp. Chính vì thế, việc dự đoán ứng suất dư và biến dạng hàn là một việc làm hết sức cần thiết nhằm nâng cao tuổi thọ làm việc của kết cấu hàn. Có rất nhiều nhà khoa học đã làm thực nghiệm để xác định ứng suất dư bằng các phương pháp: nhiễu xạ tia X, nhiễu xạ Nơ tron, siêu âm và phá huỷ,... Tuy nhiên, chi phí cho các phương pháp đo này tương đối cao và ở Việt Nam một số phương pháp đo còn hạn chế.

Vì thế, việc sử dụng công cụ mô phỏng số để dự đoán ứng suất dư và biến dạng hàn là rất cần thiết để từ đó có thể dự đoán tuổi thọ làm việc của kết cấu hàn cũng như việc

khoanh vùng những khu vực có nguy cơ hỏng hóc trong quá trình làm việc của kết cấu. Từ đó có thể đề ra các biện pháp làm giảm ứng suất dư và biến dạng một cách hợp lý.

Ngoài ra, mô phỏng số cũng làm giảm thời gian và chi phí làm thực nghiệm xuống mức thấp nhất, đồng thời làm giảm ô nhiễm môi trường. Thông qua mô phỏng số mà ta có thể giảm số lượng mẫu thực nghiệm xuống. Sức khỏe và điều kiện làm việc của người thợ được cải thiện một cách rõ rệt.

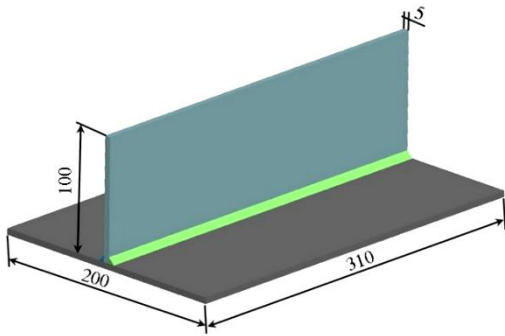
Trong bài báo này, tác giả nghiên cứu mô phỏng số quá trình hàn hồ quang trong môi trường khí bảo vệ điện cực nóng chảy (Gas Metal Arc Welding – GMAW). Tác giả sử dụng công cụ mô phỏng số với các trình tự hàn khác nhau từ đó có thể đánh giá trình tự hàn nào cho kết quả ứng suất dư và biến dạng hàn nhỏ nhất.

2. MÔ PHỎNG SỐ

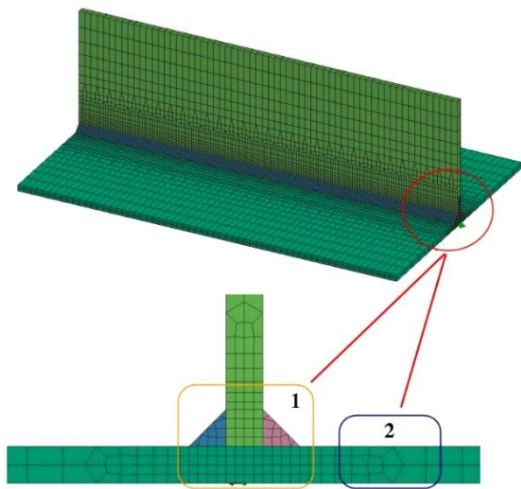
2.1 Mô hình hóa liên kết hàn

Mô hình hình học (hình 1) và mô hình hóa liên kết hàn góc kiểu chữ T bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) sử dụng phần mềm VisualMesh, [1] được thể hiện như hình 2. Vật liệu sử dụng trong mô phỏng là thép các bon thấp S355J2G3, kích thước tấm đế: 310mm×200mm×5mm và tấm vách 310mm×100mm×5mm.

Mô hình có kích thước giống với mô hình làm thực nghiệm kể cả kích thước các mối hàn. Liên kết hàn được rời rạc hóa với 55.272 phần tử (elements) và 39.254 nút (nodes). Trong đó số phần tử solid (hexa, penta, tetra) sử dụng trong mô hình là 32.116.



Hình 1. Mô hình hình học liên kết hàn chữ T



Hình 2. Kiểu lưới và vùng chia lưới

1) Vùng KLMH và HAZ; 2) Vùng KLCB.

Để kết quả mô phỏng chính xác và giảm thời gian mô phỏng, lưới ở vùng mối hàn và vùng HAZ được chia mịn hơn những vùng không chịu tác động bởi nhiệt độ cao (hình 2).

2.2 Mô hình nguồn nhiệt

Trong nghiên cứu 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), [2]. 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 Q là năng lượng của cột hồ quang. $Q = \eta \cdot U \cdot I$ [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.

2.3 Mô hình 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, [3].

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

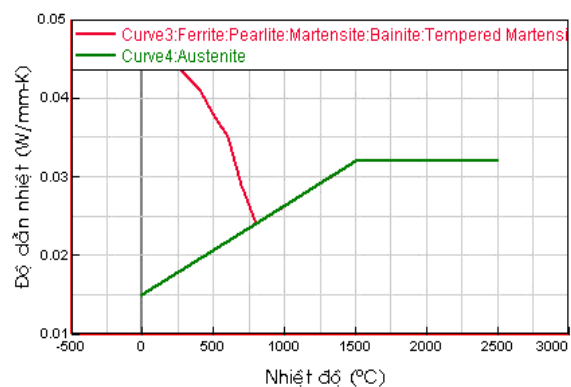
$$h(T - T_0) + \beta \epsilon (T^4 - T_0^4) = q_s \quad (3)$$

Trong đó: Q là năng lượng nhiệt tỏa 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, [4] 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:

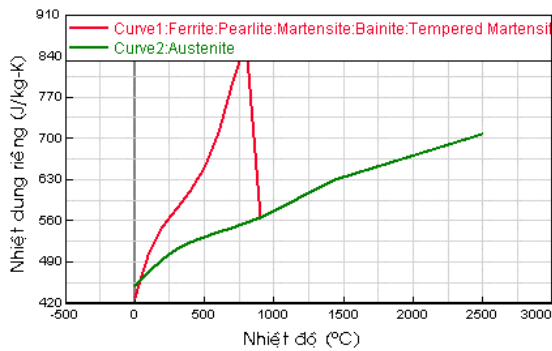
$$k \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + k \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + k \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} - u \frac{\delta Q}{\delta x^2} = -u \rho C \frac{\delta T}{\delta t} \quad (4)$$

Trong đó: u (mm/s) là vận tốc hàn

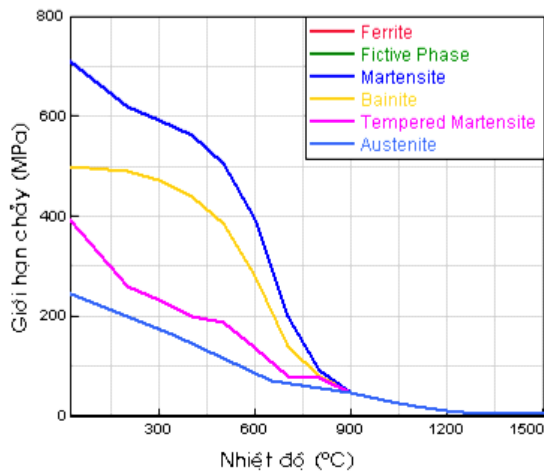
Hình 3, 4, 5 mô tả hệ số dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng và giới hạn chảy tương ứng với từng pha của vật liệu biến thiên theo nhiệt độ, [5].



Hình 3. Hệ số dẫn nhiệt của thép S355J2G3



Hình 4. Nhiệt dung riêng của thép S355J2G3



Hình 5. Giới hạn chảy của thép S355J2G3

2.4 Mô hình biến dạng

Trong quá trình mô phỏng biến dạng nhiệt của kết cấu hàn, 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).

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

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 (6).

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

Biến dạng đàn hồi được mô hình hoá dựa theo định luật Hook. [6] với nhiệt độ phụ thuộc vào mô đun đàn hồi Young 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.

Bảng 1. Mô hình nguồn nhiệt theo Goldak

Đường hàn	b (mm)	c (mm)	a_f (mm)	a_r (mm)
1	8	4	4	8
2	8	4	4	8

2.5 Các thông số của vật liệu

Thành phần hoá học và cơ tính của thép S355J2G3 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

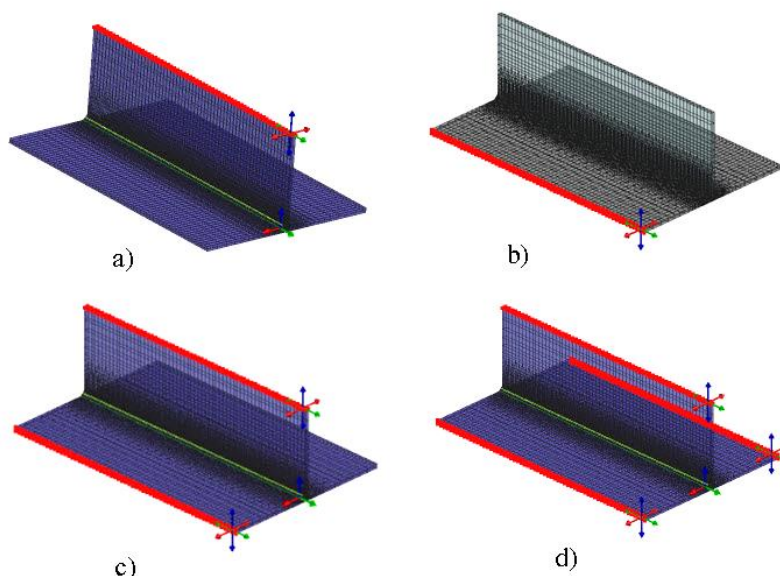
Nguyên tố	Hàm lượng, %
C	0,18
Mn	1,6
Si	0,55
S	0,035
P	0,035

Bảng 3. Tính chất vật lý của thép

Đặc tính	Giá trị
Mô đun đàn hồi (GPa)	210 (20°C)
Giới hạn chảy (MPa)	355
Hệ số Poisson	0,33
Nhiệt độ nóng chảy (°C)	1500
Nhiệt độ đông đặc (°C)	1400

2.6 Điều kiện gá kẹp

Quá trình mô phỏng liên kết hàn chữ T được thực hiện gá kẹp trong 4 trường hợp: trường hợp 1 (hình 6a) chỉ kẹp tám vách; trường hợp 2 (hình 6b) kẹp 1 bên tám đế; trường hợp 3 (hình 6c) kẹp tám vách và 1 bên tám đế; trường hợp 4 (hình 6d) kẹp tám vách và 2 bên tám đế.



Hình 6. Vị trí ngàm liên kết hàn góc chữ T

2.7 Trình tự hàn

Bài báo này tác giả nghiên cứu ảnh hưởng của trình tự hàn và điều kiện gá kẹp đến trường ứng suất dư và biến dạng khi hàn liên kết chữ T. Thời gian mô phỏng là 1000 s đối với tất cả các trường hợp. Trình tự các đường hàn được thực hiện theo 9 trường hợp sau:

Trường hợp 1: Hai đường hàn cùng chiều nhau, đường hàn 2 bắt đầu sau 400 s. Kẹp tấm vách (hình 6a)

Trường hợp 2: Hai đường hàn ngược chiều nhau, đường hàn 2 bắt đầu sau 400 s. Kẹp tấm vách (hình 6a).

Trường hợp 3: Hai đường hàn cùng chiều nhau, đường hàn 2 bắt đầu sau 400 s. Kẹp tấm vách và 1 bên tấm đế (hình 6c).

Trường hợp 4: Hai đường hàn ngược chiều nhau, đường hàn 2 bắt đầu sau 400 s. Kẹp tấm vách và 1 bên tấm đế (hình 6c).

Trường hợp 5: Hai đường hàn cùng chiều nhau, đường hàn 2 bắt đầu sau 400 s. Kẹp tấm vách (hình 6b)

Trường hợp 6: Hai đường hàn cùng chiều nhau, đường hàn 2 bắt đầu sau 400 s. Kẹp tấm vách và 2 bên tấm đế (hình 6d).

Trường hợp 7: Hai đường hàn ngược chiều nhau, đường hàn 2 bắt đầu sau 400 s. Kẹp tấm vách và 2 bên tấm đế (hình 6d).

Trường hợp 8: Hai đường hàn cùng chiều nhau và đồng thời cùng lúc. Kẹp tấm vách và 2 bên tấm đế (hình 6d).

Trường hợp 9: Hai đường hàn ngược chiều nhau và đồng thời cùng lúc. Kẹp tấm vách và 2 bên tấm đế (hình 6d).

Lưu ý: Khi hàn đường tiếp theo vật hàn được làm nguội xuống dưới 100 °C.

Bảng 4. Chế độ hàn góc thép tấm, [7]

Đường hàn	I_h (A)	U_h (V)	V_h (mm/s)	D_d (mm)
1	140	25	5	1,0
2	145	26	5	1,0

Trong đó: V_h : Vận tốc hàn [mm/s]; D_d : Đường kính dây hàn [mm].

Bảng 5. Thông số mô phỏng, [8]

Đường hàn	Năng lượng đường (J/mm)	Vận tốc hàn (mm/s)
1	600	5
2	640	5

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ NHẬN XÉT

Sau khi mô hình hóa liên kết hàn góc chữ T, khai báo thuộc tính của vật liệu, công suất nguồn nhiệt và thiết lập các điều kiện tính toán như đã mô tả ở trên. Giải bài toán ta thu được kết quả sau:

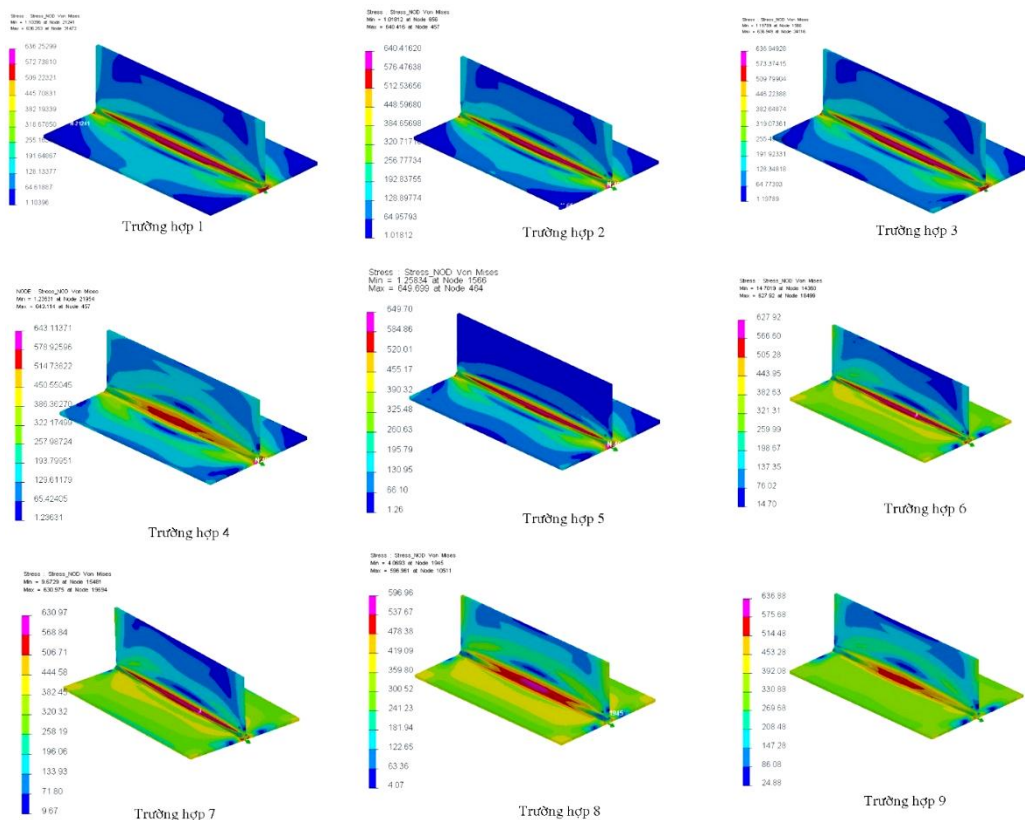
3.1 Ứng suất dư

Khi nguồn nhiệt hàn di chuyển dọc theo đường hàn, trong liên kết sẽ xuất hiện một trường phân bố ứng suất nhiệt tức thời và biến dạng. Sau khi làm nguội do điều kiện gá kẹp, trình tự hàn và kiểu liên kết dẫn đến sự xuất hiện ứng suất dư và biến dạng ở vùng mối hàn và vùng HAZ.

Bảng 6. Ứng suất dư tổng

Trường hợp	Ứng suất dư, [MPa]
1	636,25
2	640,41
3	636,95
4	639,77
5	649,70
6	627,92
7	630,97
8	596,96
9	636,88

Trong bảng 6 là kết quả ứng suất dư tương ứng với 9 trường hợp mô phỏng trên. Ta thấy rằng, trường hợp 8 cho kết quả ứng suất dư nhỏ nhất (596,96 MPa). Trường hợp 5 cho kết quả ứng suất dư lớn nhất (649,70 MPa).



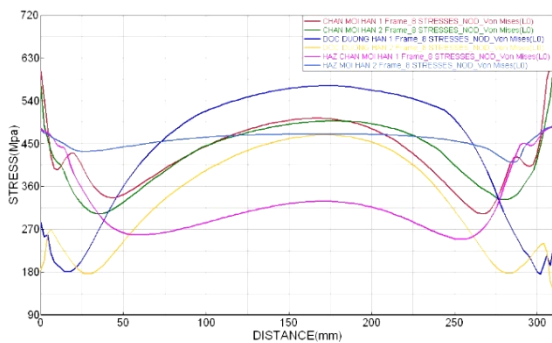
Hình 7. Sự phân bố ứng suất dư trong liên kết hàn góc

Như vậy, với cùng thông số chế độ hàn chỉ khác nhau thứ tự thực hiện các đường hàn, điều kiện gá kẹp thông qua mô phỏng mà ta

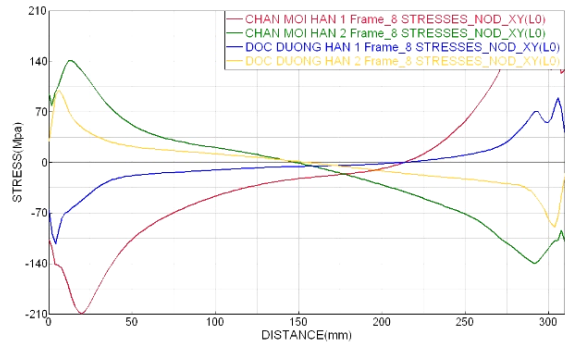
dự đoán được sự phân bố ứng suất dư của từng trường hợp hàn cụ thể. Dựa vào các đồ thị hình 8 ta nhận thấy sự phân bố ứng suất dư

đường hàn trước bao giờ cũng lớn hơn đường hàn sau. Trường hợp 9 ứng suất dư chỉ tập trung vào giữa của liên kết hàn, điều này hoàn toàn khác so với các trường hợp chỉ ngàm tấm vách hoặc ngàm tấm vách và 1 bên tấm đế. Ứng suất dư ở các trường hợp 1, 2, 3, 4 phân bố gần hết chiều dài đường hàn.

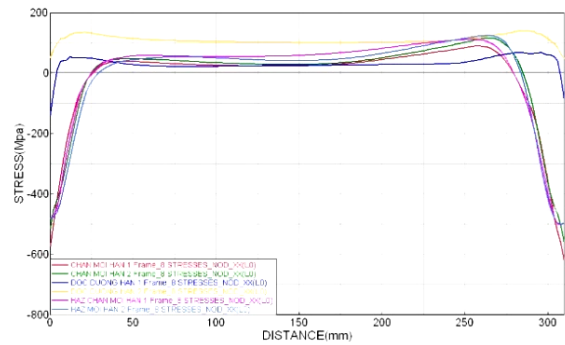
Ta nhận thấy rằng nếu hàn 2 phía cùng chiều và cùng lúc, điều kiện gá kẹp như hình 6d cho ta ứng suất dư là nhỏ nhất. Tuy nhiên, trường hợp này chỉ áp dụng với những kết cấu lớn. Và trình tự hàn 5 cho kết quả ứng suất dư lớn nhất khi kẹp 1 bên tấm đế (hình 6b).



Hình 8. Ứng suất dư tổng

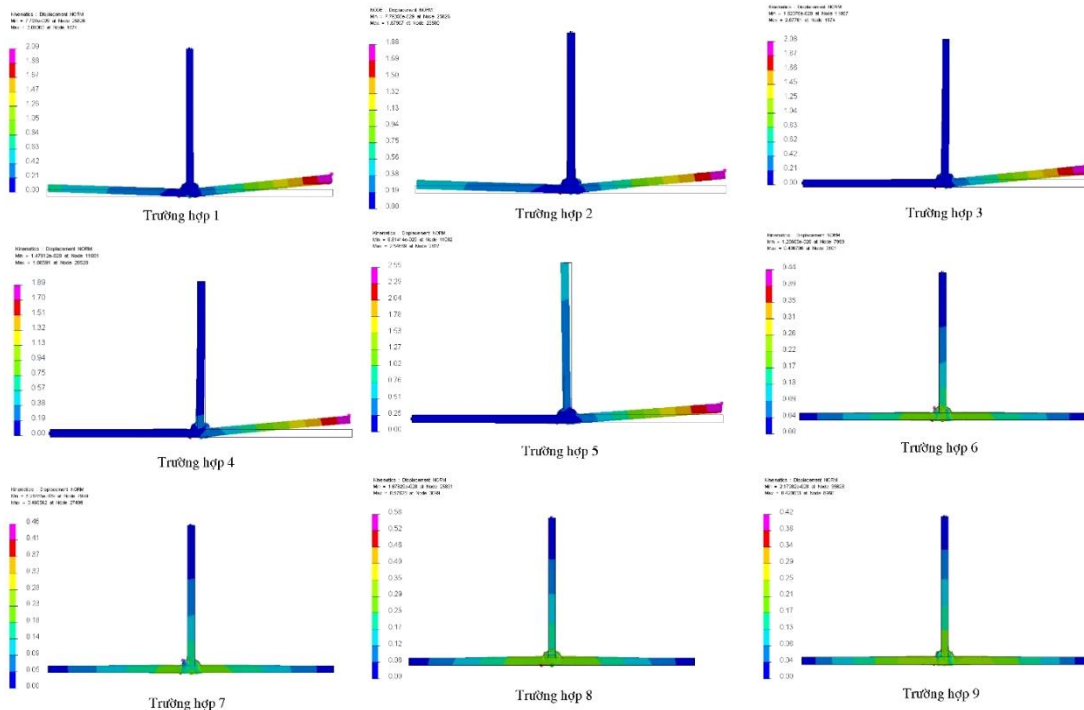


Hình 9. Ứng suất dư tiếp tuyến



Hình 10. Ứng suất dư pháp tuyến

3.2 Biến dạng



Hình 11. Biến dạng góc

Hình 11 thể hiện biến dạng góc của 9 trường hợp hàn nêu trên, ta nhận thấy biến dạng góc của các trường hợp 1 và 3; trường hợp 2 và 4 có chênh lệch biến dạng là không đáng kể. Tuy nhiên trong trường hợp 5 biến dạng lớn nhất (2,55mm).

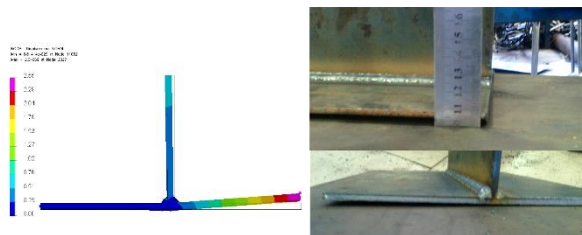
Tương tự với các trường hợp 6, 7, 8, 9. Khi ngàm cả 3 vị trí kết quả cho biến dạng nhỏ hơn so với các trường hợp 1, 2, 3, 4. Biến dạng nhỏ nhất nhận được là 0,42mm.

Bảng 7. Biến dạng tổng

Trường hợp	Biến dạng [mm]
1	2,09
2	1,88
3	2,08
4	1,89
5	2,55
6	0,44
7	0,46
8	0,58
9	0,42

Trong bảng 7 chỉ ra rằng biến dạng ở các trường hợp 5, 6, 7, 8 là tương đối nhỏ. Nguyên nhân do các trường hợp trên liên kết hàn bị ngàm như trong hình 6d.

3.3 Kết quả mô phỏng và thực nghiệm

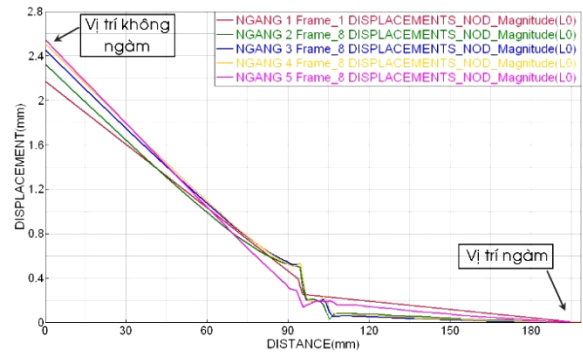


Hình 12. So sánh biến dạng góc

Hình 12 là kết quả biến dạng của trường hợp 5 giữa mô phỏng và thực nghiệm.

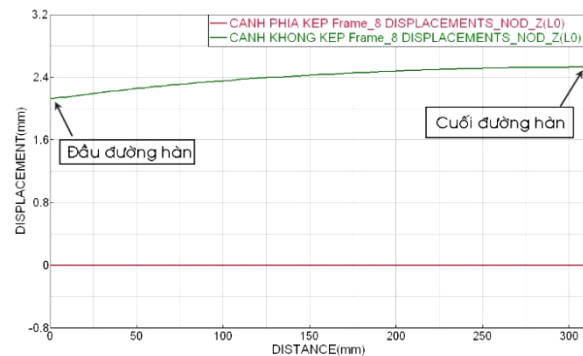
Bảng 8. Kết quả biến dạng lớn nhất giữa thực nghiệm và mô phỏng

Mô phỏng (Max)	Thực nghiệm (Max)
2,55 mm	2,85 mm



Hình 13. Kết quả biến dạng góc

Hình 13 là kết quả biến dạng góc đo được tại 5 vị trí khác nhau cốt ngang qua liên kết hàn.



Hình 14. Sự phân bố biến dạng dọc mỗi hàn

Trên hình 14 thể hiện sự phân bố biến dạng dọc theo đường hàn của tấm đế. Kết quả cho ta biến dạng tăng dần từ đầu đường hàn về phía cuối đường hàn.

Ta nhận thấy rằng kết quả giữa mô phỏng và thực nghiệm chênh lệch nhau tương đối nhỏ với kết quả này hoàn toàn có thể chấp nhận được và có thể áp dụng vào các kết cấu hàn góc với các chiều dày khác nhau.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã mô phỏng được trường ứng suất dư và biến dạng cho liên kết hàn góc kiểu ghép chữ T, hàn 2 phía bằng phương pháp hàn GMAW.

Bằng việc thay đổi trình tự hàn và điều kiện gá kẹp thông qua phần mềm Sysweld/ VisualWeld ta tìm ra được trình tự hàn cho ứng suất dư và biến dạng nhỏ nhất.

Dựa vào kết quả mô phỏng số trường ứng suất dư và biến dạng của liên kết hàn góc chữ T mà ta có thể dự đoán được:

+ Trường ứng suất dư và biến dạng đối với liên kết hàn góc chữ T bằng phương pháp hàn GMAW.

+ Sự phân bố ứng suất tại một nút bất kỳ.

+ Ảnh hưởng của trình tự hàn đến sự phân bố ứng suất dư của liên kết hàn góc chữ T.

+ Vùng tập trung ứng suất dư lớn nhất của từng trường hợp.

+ Sự phân bố ứng suất dư của liên kết hàn góc chữ T khi thay đổi điều kiện gá kẹp.

+ Ứng suất dư ở đường hàn trước luôn lớn hơn ứng suất dư ở đường hàn sau (hình 8).

+ Ảnh hưởng của trình tự hàn đến mức độ biến dạng của liên kết hàn góc chữ T.

+ Biến dạng xuất hiện tại phía không bị kẹp chặt, phía kẹp chặt biến dạng bằng 0 (hình 13).

+ Biến dạng ở đầu đường hàn luôn nhỏ hơn ở vị trí cuối đường hàn (hình 14).

Mô phỏng số thực sự là một công cụ hữu ích và đáng tin cậy trong tính toán và phân tích sự biến thiên nhiệt độ, ứng suất tại một thời điểm bất kỳ trong liên kết và biến dạng dư. Qua đó có thể dự đoán được khả năng hình thành mối hàn cũng như các khuyết tật có thể xuất hiện trong quá trình hàn thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Tiến Dương, *Mô phỏng quá trình truyền nhiệt khi hàn*, Hà Nội, 2008.
- [2] Trần Văn Địch, *Sổ tay thép thế giới*, NXB Khoa học kỹ thuật Hà Nội, 2004.
- [3] Nguyễn Hồng Thanh, Hà Xuân Hùng, Nguyễn Tiến Dương, *Mô phỏng số trường nhiệt độ khi hàn liên kết chữ T thép A36 bằng phương pháp hàn GMAW*, Tạp chí cơ khí Việt Nam, số 6 (2014).
- [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] T. R Gruney: *Fatigue of Welded Structures*, Cambridge University Press, 1979.
- [7] K. Masubuchi: *Analysis of Welded Structures*, Pergamon Press, 1980.
- [8] Jeffrey Packer, *Steel Design Guide (AISC)*, 2010.
- [9] 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.
- [10] Goldak, J., Chakravarti, A., and Bibby, M. (1984) *A new finite element model for welding heat source*. Metallurgical Transactions B, 15B, 299-305.
- [11] ESI Group, 99 Rue Des, Solets Silic 112 94513 Rungis Cedex FRANCE.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết

ThS. Nguyễn Hồng Thanh

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định

Email: thanh.we@gmail.com