

Ảnh hưởng của năng lượng đường và xử lý nhiệt sau hàn đến ứng suất dư và biến dạng của liên kết hàn giáp mối thép cacbon kết cấu A516 grade 70

Effect of heat-input and post-weld heat treatment on residual stress and deformation of butt welded joint made by structural carbon steel A516 grade 70

TRẦN THỊ XUÂN¹, VŨ ĐÌNH TOẠI^{2,*}

¹. Trường Vật liệu, Đại học Bách khoa Hà Nội, Số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội

². Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội, Số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội

*Email: toai.vudinh@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 17/1/2023, Ngày duyệt đăng: 16/5/2023

TÓM TẮT

Ứng suất dư và biến dạng hàn là những yếu tố bất lợi và luôn luôn tồn tại trong liên kết hàn. Chúng làm suy giảm nghiêm trọng khả năng chịu tải của kết cấu hàn, đồng thời làm méo mó gây mất tính thẩm mỹ của kết cấu hàn. Do đó việc biết trước ảnh hưởng của chế độ hàn mà cụ thể là năng lượng đường đến ứng suất dư và biến dạng của liên kết hàn có ý nghĩa rất lớn, giúp xác định được chế độ hàn hợp lý đối với từng liên kết hàn cụ thể. Biến dạng hàn có thể dễ dàng đo đạc bằng các dụng cụ đo phổ thông, nhưng việc xác định ứng suất dư trong liên kết hàn bằng thực nghiệm gặp rất nhiều khó khăn nhất là ở phía trong của vật liệu, vì thế nghiên cứu này đề xuất giải pháp xác định ứng suất dư cũng như biến dạng hàn bằng tính toán mô phỏng số sử dụng phần mềm SYSWELD với chi phí ít nhất và thời gian nhanh nhất. Kết quả nghiên cứu cho biết rằng khi hàn với năng lượng đường càng lớn thì ứng suất dư trong liên kết hàn sẽ càng lớn, gây ra biến dạng dọc và biến dạng ngang cũng lớn theo. Đối với liên kết hàn giáp mối bằng thép cacbon kết cấu mác A516 grade 70 dày 16 mm cần phải hàn 4 đường với năng lượng đường cho ứng suất dư và biến dạng nhỏ nhất lần lượt là $q_1=2252$ J/mm, $q_2=2828$ J/mm, $q_3=2458$ J/mm, và $q_4=2878$ J/mm. Việc xử lý nhiệt ngay sau khi hàn ở 595 °C trong 40 phút sẽ giảm được ứng suất dư 3,45 lần, giảm biến dạng dọc 2,82 lần, giảm biến dạng ngang 1,54 lần và giảm biến dạng góc 1,32 lần.

Từ khóa: Ứng suất dư, biến dạng hàn, mô phỏng số, năng lượng đường, xử lý nhiệt sau hàn.

ABSTRACT

Residual stress and welding deformation are unfavorable factors and always exist in the welded joint. They seriously reduce the working capacity of the welded structure, and at the same time disfigure the aesthetics of the welded structure. Therefore, knowing the influence of the welding parameter, specifically the heat-input, on the residual stress and deformation of the welded joint is of great significance, helping to determine the appropriate welding parameter for each specific welding joint. Welding deformation can be easily measured with common measuring instruments, but determining the residual stress in the welded joint by experiment encounters many difficulties, especially in the interior of the material, so this study proposes a solution to determine the residual stress as well as welding deformation by numerical simulation using SYSWELD software with the least cost and fastest time. The research results show that when welding with a higher heat-input, the residual stress in the welded joint will be greater, causing the longitudinal and transverse deformations to be larger. For a butt welding joint made of structural carbon steel A516 grade 70 with 16 mm thickness, it is necessary to weld 4 passes with the heat-input respectively for the minimum residual stress and deformation are $q_1=2252$ J/mm, $q_2=2828$ J/mm, $q_3=2458$ J/mm, and $q_4=2878$ J/mm. The post-weld heat treatment immediately after welding at 595 °C for 40 minutes will reduce residual stress 3.45 times, reduce longitudinal deformation 2.82 times, reduce transverse deformation 1.54 times, and reduce the angular deformation 1.32 times.

Keywords: Residual stress, welding deformation, numerical simulation, heat-input, post-weld heat treatment.

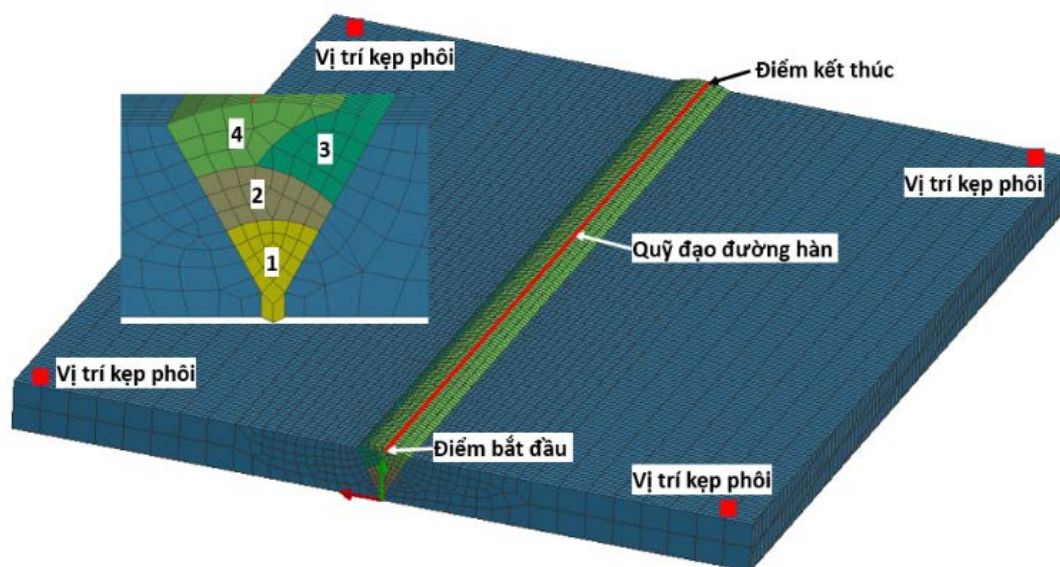
1. MỞ ĐẦU

Do việc nung nóng và làm nguội không đều, kết hợp với sự chuyển biến pha của kim loại mà trong liên kết hàn thường tồn tại ứng suất dư và biến dạng hàn [1]. Ứng suất dư trong liên kết hàn sẽ làm giảm khả năng chịu lực của kết cấu hàn, đồng thời là nguyên nhân gây ra biến dạng hàn. Một kết cấu hàn bị biến dạng sẽ không chỉ làm mất đi tính thẩm mỹ mà còn làm sai lệch vị trí đặt tải theo thiết kế ban đầu dẫn tới hình thành các lực không mong muốn và tiếp tục làm cho kết cấu bị suy giảm khả năng chịu lực. Chính vì thế mà việc biết trước ảnh hưởng của chế độ hàn đến ứng suất dư và biến dạng hàn có ý nghĩa quan trọng, giúp lựa chọn được chế độ hàn hợp lý nhất đối với liên kết hàn cụ thể. Biến dạng hàn có thể được xác định bằng các dụng cụ đo phổ thông, nhưng việc xác định ứng suất dư trong liên kết hàn bằng thực nghiệm là rất khó khăn và tốn kém bởi chỉ

có thể đo được ứng suất dư ở trên bề mặt và trong lớp mỏng sát bề mặt của vật liệu – ngay cả khi sử dụng phương pháp đo tiên tiến là nhiễu xạ nơ-tron hay nhiễu xạ rơn-ghen [2]. Để xác định được ứng suất dư ở mọi vị trí cũng như biến dạng theo các phương của liên kết hàn, nghiên cứu này đề xuất phương pháp tính toán mô phỏng số bằng phần mềm Sysweld. Thông qua phân tích ảnh hưởng của năng lượng đường đến ứng suất dư và biến dạng hàn theo các phương, chế độ hàn hợp lý đối với liên kết hàn cụ thể sẽ được xác định. Việc khảo sát ảnh hưởng của xử lý nhiệt sau hàn đến ứng suất dư và biến dạng của liên kết hàn sẽ biết được hiệu quả của việc xử lý nhiệt sau hàn đối với liên kết hàn nóng chảy.

2. BÀI TOÁN MÔ PHỎNG SỐ

2.1. Mô hình phần tử hữu hạn (PTHH)



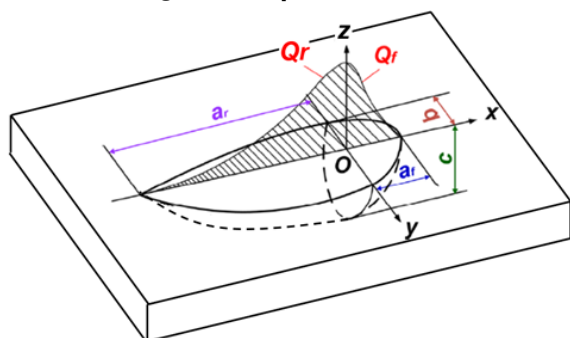
Hình 1. Mô hình PTHH, vị trí kẹp phôi và quỹ đạo đường hàn

Mô hình nghiên cứu là liên kết hàn giáp mối bằng thép cacbon kết cấu mác A516 grade 70 với kích thước của mỗi tấm là (Dài x Rộng x Dày) = 300 x 124 x 16 (mm) theo quy phạm hàn thép kết cấu AWS D1.1 của Hiệp hội hàn Mỹ. Liên kết hàn giáp mối thép cacbon dày 16 mm cần được vát mép dạng chữ V với các thông số cụ thể như sau: khe đáy $R = 2$

mm, mặt đáy $f = 2$ mm, góc rãnh hàn $\alpha = 60^\circ$ [3]. Số đường hàn của liên kết này được xác định theo các công thức trong tài liệu [4] là $n = 4$. Sử dụng mô đun Visual-Mesh của phần mềm SYSWELD để xây dựng mô hình 3D và chọn loại phần tử 6 mặt 18 nút để chia lưới ta được mô hình PTHH như biểu diễn trên

hình 1, gồm 45300 nút, 38250 phần tử khối 3D và 26528 phần tử mặt 2D.

2.2. Mô hình nguồn nhiệt hàn



Hình 2. Mô hình nguồn nhiệt hàn MAG [5]

trong đó, Q_f là mật độ nguồn nhiệt phía trước tâm hồ quang, Q_r là mật độ nguồn nhiệt phía sau tâm hồ quang, a_f là chiều dài vũng hàn trước tâm hồ quang, a_r là chiều dài vũng hàn sau tâm hồ quang, b là nửa bề rộng vũng hàn và c là chiều sâu ngấu.

Trong số các quá trình hàn phù hợp với thép cacbon kết cấu [6] tác giả chọn quá trình hàn MAG và sử dụng nguồn nhiệt hàn tương ứng có dạng Elipsoid như biểu diễn trên hình 2. Loại mô hình nguồn nhiệt này mô tả cột hồ quang di động khi hàn một cách chính xác và đã được tích hợp sẵn trong mô đun Visual-Weld của phần mềm SYSWELD [7].

2.3. Điều kiện biên và điều kiện đầu

Nơi diễn ra các quá trình đối lưu và bức xạ nhiệt từ mô hình ra môi trường xung quanh là 26528 phần tử mặt 2D. Hàm truyền nhiệt đối lưu và bức xạ này được xác định bằng thực nghiệm rồi nhập vào phần mềm SYSWELD. Trong nghiên cứu này tác giả sử dụng hàm truyền nhiệt trong điều kiện không khí tĩnh có sẵn trong thư viện của phần mềm [7].

Vị trí và kiểu kẹp phôi khi hàn trong nghiên cứu này được mô tả trên hình 1, ở đây mô hình được kẹp chặt ở 4 góc. Nhiệt độ ban đầu của toàn bộ mô hình lấy bằng 30°C (bằng nhiệt độ của môi trường không khí).

2.4. Cơ sở dữ liệu của vật liệu

Trong nghiên cứu này tác giả sử dụng bộ thông số cơ – nhiệt – kim loại học của thép A516 grade 70 gồm các hàm: khối lượng riêng, hệ số dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng, hệ số biến dạng nhiệt, mô đun đàn hồi, giới hạn chảy và giản đồ chuyển biến pha khi nguội liên tục (CCT diagram) như nhóm tác giả trong tài liệu [8].

2.5. Quỹ đạo đường hàn và năng lượng đường

Do tấm phôi có chiều dày không lớn với góc rãnh hàn 60° nên quỹ đạo của các đường hàn trong nghiên cứu này là đường thẳng (không dao động ngang) [6]. Vị trí bắt đầu gây hồ quang của cả 4 đường hàn cùng nằm ở một đầu của liên kết và điểm kết thúc hồ quang cũng cùng nằm ở cuối mép hàn như mô tả trên hình 1.

Bảng 1. Năng lượng đường ở các phương án hàn

Phương án hàn	Năng lượng đường lớp lót [J/mm]	Năng lượng đường lớp điện đầy [J/mm]	Năng lượng đường lớp phủ 1 [J/mm]	Năng lượng đường lớp phủ 2 [J/mm]
PA1	1552	1878	1878	1878
PA2	2252	2828	2458	2878
PA3	2302	3078	2488	3128
PA4	2352	3328	2518	3378
PA5	2402	3578	2548	3628
PA6	2452	3828	2578	3878

Kế thừa các năng lượng đường nêu trong bảng 1 của nhóm tác giả trong tài liệu [8], trong đó phương án hàn PA1 chưa đủ ngấu, phương án hàn PA5 bị khuyết tật chảy xệ, còn phương án hàn PA6 bị khuyết tật cháy thủng. Nghiên cứu này sẽ tính toán mô phỏng ứng suất dư và biến dạng hàn ở các phương án hàn PA2, PA3 và PA4 là các phương án hàn đảm bảo đủ ngấu và không bị các khuyết tật hình dáng [8].

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Quá trình tính toán các ứng xử cơ học của liên kết hàn khi để nguội trong không khí tĩnh 5400 giây (1,5 giờ) đến nhiệt độ môi trường (30 °C) sẽ cho biết ứng suất dư và biến dạng cuối cùng của liên kết hàn. Việc khảo sát này có vai trò quan trọng giúp xác định được chế độ hàn hợp lý với ứng suất dư và biến dạng nhỏ nhất, đồng thời là cơ sở để áp dụng các biện pháp kỹ thuật làm giảm ứng suất dư và biến dạng hàn.

3.1. Ứng suất dư trong liên kết hàn

Kết quả tính toán trường ứng suất dư tương đương Von Mises phân bố trong liên kết hàn giáp mối 3 lớp 4 đường được làm từ thép cacbon kết cấu A516 grade 70 ở các phương án hàn PA2, PA3, PA4 trong bảng 1 được thể hiện trong hình 3 dưới đây.

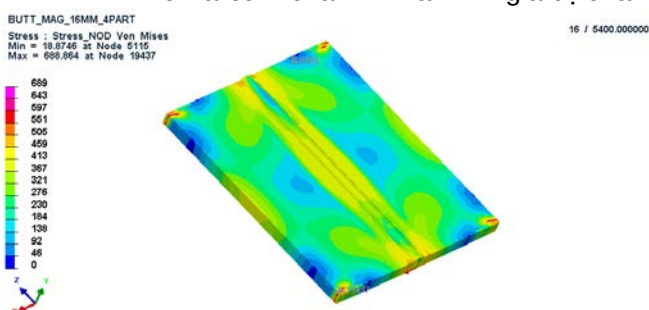
Dễ dàng nhận thấy rằng hình dạng phân bố trường ứng suất dư Von Mises ở các phương án hàn là giống nhau, chúng chỉ khác nhau về trị số của ứng suất dư tại các vị trí trong liên kết hàn. Kết quả tính toán mô phỏng trên hình 3 cho biết rằng ứng suất dư lớn nhất trong liên kết hàn luôn xuất hiện tại các vị trí kẹp phôi – điều này phản ánh đúng với lý thuyết về ứng suất & biến dạng hàn [1], bởi vì tại đây vật liệu bị kẹp chặt mà không được biến dạng một cách tự do. Bên cạnh vị trí kẹp phôi thuộc 2 mép của liên kết thì ứng suất dư lại rất nhỏ.

Trong liên kết hàn, các vùng có ứng suất dư khá lớn nằm ở đầu và cuối của mỗi hàn với giá trị của

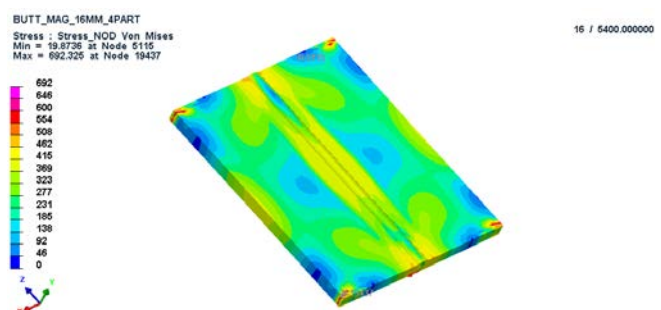
ứng suất dư Von Mises ở đầu và cuối mỗi hàn là tương đương nhau. Điều này phản ánh đúng với quy định trong tiêu chuẩn ISO 15614 khi kiểm tra phê chuẩn quy trình hàn (WPS) là người ta yêu cầu loại bỏ 25 mm ở đầu và cuối mỗi hàn [9]. Xét theo tiết diện ngang của mỗi hàn thì ứng suất dư lớn nằm ở vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) của đường hàn lót và đi từ đáy liên kết lên trên mặt thì ứng suất dư giảm dần. Sở dĩ có điều này là vì khi hàn đường hàn lót, do phôi hàn còn đang nguội nên chênh lệch nhiệt độ giữa mỗi hàn và kim loại cơ bản là rất lớn, gây ra ứng suất nhiệt do giãn nở không đều. Đây cũng là lý do mà trong một số liên kết hàn quan trọng người ta thường yêu cầu dùi bỏ hoàn toàn đường hàn lót và vùng HAZ của đường hàn lót rồi tiến hành hàn lại đường hàn này [6].

Vùng giữa của liên kết hàn bao gồm mỗi hàn và vùng HAZ cũng có ứng suất dư tương đương Von Mises tương đối lớn, nhưng bên cạnh nó về 2 phía lại là các vùng có ứng suất dư nhỏ, rồi ứng suất lại tăng lên khi đi ra xa về 2 bên mép của liên kết.

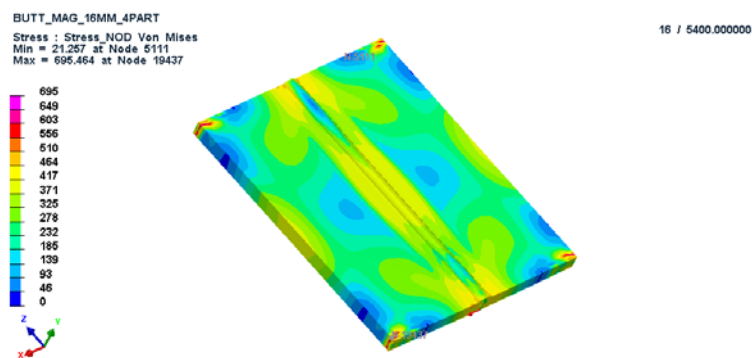
Xét về tổng thể ta dễ dàng nhận thấy rằng trường ứng suất dư tương đương Von Mises phân bố trong liên kết hàn giáp mối là đối xứng qua các trục của mỗi hàn. Ứng suất dư trong các vùng phân bố không đều nhau, trong đó ngoài các vị trí kẹp phôi có ứng suất lớn nhất thì ứng suất dư lớn tập trung ở vùng HAZ của liên kết.



a) Phương án hàn PA2



b) Phương án hàn PA3



c) Phương án hàn PA4

Hình 3. Trường ứng suất dư tương đương Von Mises trong liên kết hàn giáp mối ở các phương án hàn

So sánh các kết quả tính toán ứng suất dư tương đương Von Mises khi hàn ở các phương án khác nhau (bảng 2) ta thấy rằng phương án hàn PA2 có ứng suất dư Von Mises ở tất cả các vị trí đều nhỏ nhất. Phương án hàn PA3 có ứng suất dư lớn hơn phương án hàn PA2, nhưng nhỏ hơn phương án hàn PA4. Điều này có nghĩa là khi hàn với năng lượng đường càng lớn hay nhiệt cấp vào liên kết hàn càng cao thì ứng suất dư trong liên kết hàn càng lớn. Kết quả này cũng phù hợp với lý thuyết [6]. Kết quả thống kê trong bảng 2 cũng cho biết rằng tất cả các giá trị ứng suất dư đều vượt giới hạn chảy của thép A516 grade 70 là 260 MPa nghĩa là ứng suất dư đã gây biến dạng cho liên kết hàn. Từ đây nhu cầu xử lý nhiệt liên kết hàn để khử bỏ ứng suất dư và giảm biến dạng cho liên kết hàn là rất cần thiết.

Bảng 2. Ứng suất dư tương đương Von Mises (MPa) ở các phương án hàn

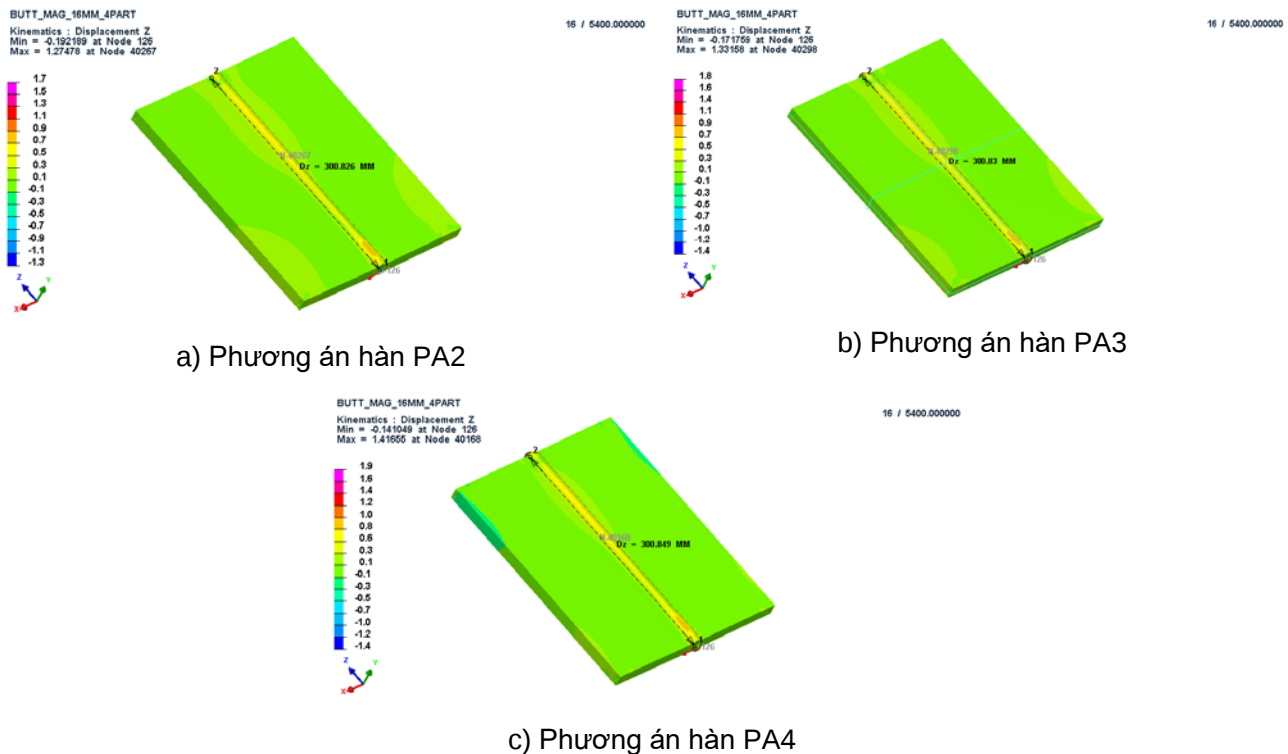
Phương án hàn	Vị trí kẹp phôi	Đầu, cuối mối hàn	Giữa mối hàn
PA2	688,864	459	367
PA3	692,325	461	369
PA4	695,464	463	370

3.2. Biến dạng dọc của liên kết hàn

Sử dụng công cụ hiển thị trong mô đun Visual-Viewer của phần mềm SysWeld để đọc kết quả tính toán chuyển vị theo chiều Z là chiều dọc của liên kết hàn sẽ thấy được mức độ biến dạng dọc của liên kết hàn. Kết quả xác định chuyển vị dọc của liên kết hàn được cho trên hình 4 với dấu âm (-) thể hiện rằng chiều chuyển vị có hướng ngược với chiều của trục Z.

Dễ dàng nhận thấy hình dạng phân bố chuyển vị theo phương Z ở các phương án hàn là giống nhau (hình 4), chúng chỉ khác nhau về trị số nhưng khác biệt này là tương đối nhỏ. Kết quả tính toán cho biết rằng chuyển vị theo phương Z tập trung chủ yếu ở vùng mối hàn. Sở dĩ có điều này bởi vì vùng mối hàn là vùng được nung nóng nhất nên giãn nở nhiều nhất.

Khi hàn ở phương án PA2 thì chuyển vị dọc lớn nhất là 1,275 mm ở nút 40267 nằm ở trên đường hàn phủ. Khi hàn ở các phương án PA3 và PA4 thì chuyển vị dọc lớn nhất bị tăng lên, tương ứng là 1,332 mm ở nút 40298 và 1,417 mm ở nút 40168 cũng đều nằm ở trên đường hàn phủ.



Hình 4. Chuyển vị dọc của liên kết giáp mối ở các phương án hàn

Với chiều dài của mô hình ban đầu là 300 mm, tiến hành đo kích thước dài của mô hình sau khi hàn bằng công cụ đo chiều dài của mô đun Visual-Viewer sẽ xác định được mức độ biến dạng dọc của liên kết hàn. Kết quả trong bảng 3 cho thấy phương án hàn PA4 gây ra biến dạng dọc nhiều nhất với mức dư thừa là 0,85 mm. Khi hàn ở phương án PA3 với năng lượng đường nhỏ hơn thì mức độ biến dạng dọc cũng nhỏ hơn chỉ với 0,83 mm, còn nếu hàn ở phương án PA2 với mức năng lượng đường vừa đủ ngẫu nhiên thì mức độ biến dạng dọc cũng nhỏ nhất với mức dư thừa chỉ là 0,82 mm.

Bảng 3. Chuyển vị và biến dạng dọc của liên kết ở các phương án hàn

Phương án hàn	Chuyển vị max (mm)	Chiều dài liên kết hàn (mm)	Biến dạng dọc (mm)
PA2	1,275	300,82	0,82
PA3	1,332	300,83	0,83
PA4	1,417	300,85	0,85

3.3. Biến dạng ngang của liên kết hàn

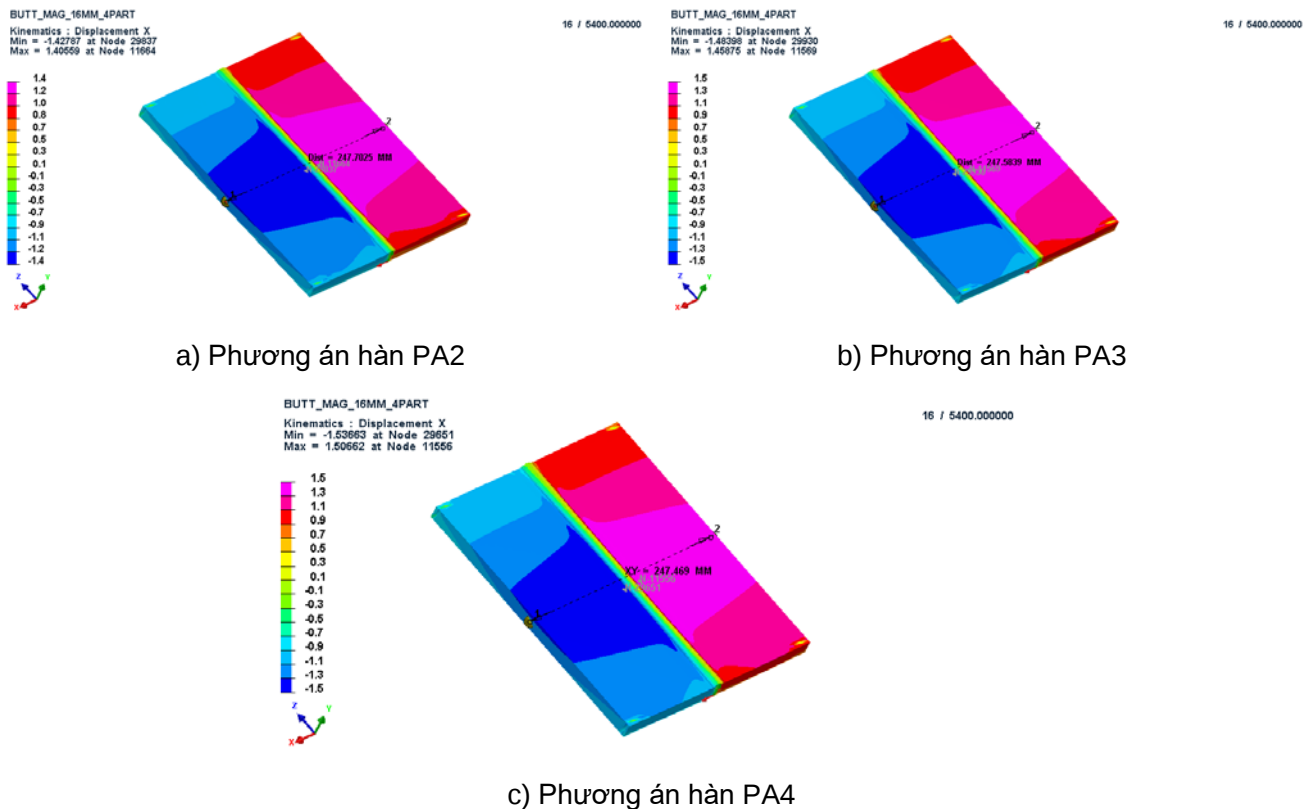
Hiện thị chuyển vị theo phương X là phương ngang của liên kết hàn và tiến hành đo kích thước ngang của liên kết sau khi hàn sẽ xác định được mức độ biến dạng ngang của liên kết hàn. Kết quả xác định chuyển vị ngang của liên kết hàn được cho trên hình 5 với dấu âm (-) thể hiện chiều chuyển vị có hướng ngược với chiều của trục X.

Kết quả tính toán chuyển vị ngang trên hình 5 cho biết rằng phân bố chuyển vị theo phương X khi hàn ở các phương án PA2, PA3 và PA4 là giống nhau về hình thái nhưng khác nhau về giá trị. Dựa vào chiều của chuyển vị, dễ dàng thấy rằng sau khi hàn thì liên kết bị co ngang.

Khi hàn ở phương án PA2 thì chuyển vị cực đại theo phương X là 1,428 mm, còn nếu hàn ở các phương án PA3 và PA4 thì chuyển vị cực đại theo phương X tăng lên lần lượt là 1,484 mm và 1,537

mm. Dải màu trên hình 5 cũng cho biết vùng giữa của liên kết ở xa các vị trí kẹp phôi sẽ bị co ngang nhiều nhất và độ co ngang giảm dần về 2 phía kẹp

phôi - điều này phù hợp với lý thuyết ứng suất và biến dạng hàn.



Hình 5. Chuyển vị ngang của liên kết giáp mối ở các phương án hàn

Với chiều rộng của mô hình ban đầu là 250 mm, tiến hành đo kích thước dài của mô hình sau khi hàn bằng công cụ đo chiều dài của mô đun Visual-Viewer sẽ xác định được mức độ biến dạng ngang của liên kết hàn. Kết quả trong bảng 4 cho thấy phương án hàn PA2 với mức năng lượng đường vừa đủ ngẫu thì biến dạng co ngang chỉ là 2,30 mm, nhưng nếu hàn ở phương án PA3 với năng lượng đường lớn hơn thì mức độ co ngang sẽ tăng lên đến 2,42 mm. Trường hợp hàn ở phương án PA4 với năng lượng đường lớn hơn nữa thì độ co ngang của liên kết hàn cũng tăng lên (2,53 mm).

Kết quả tính toán biến dạng ngang (bảng 4) lớn hơn nhiều so với biến dạng dọc (bảng 3), điều đó cho biết liên kết giáp mối chủ yếu bị co ngang, do

vậy mà khi hàn cần phải quan tâm đến sự hụt kích thước theo chiều ngang.

Bảng 4. Chuyển vị và biến dạng ngang của liên kết ở các phương án hàn

Phương án hàn	Chuyển vị max (mm)	Chiều rộng liên kết hàn (mm)	Biến dạng ngang (mm)
PA2	1,428	247,70	2,30
PA3	1,484	247,58	2,42
PA4	1,537	247,47	2,53

3.4. Biến dạng góc của liên kết hàn

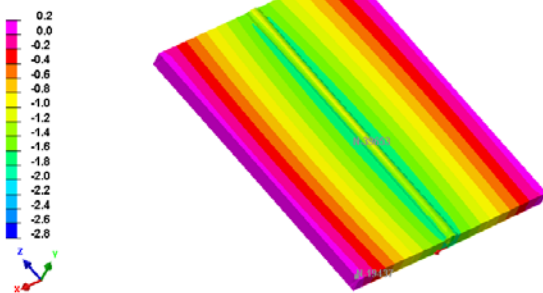
Kết quả tính toán chuyển vị theo phương Y là hướng chiều dày của liên kết được mô tả trên hình 6. Kết quả này sẽ thể hiện biến dạng góc của liên kết

sau khi hàn, trong đó giá trị có dấu âm (-) thể hiện chiều chuyển vị ngược với chiều của trục Y.

Do phôi được kẹp chặt ở 4 vị trí sát 4 góc của liên kết (hình 1) nên chuyển vị tại các vị trí này sẽ bằng 0. Kết quả tính toán chuyển vị theo phương Z trên hình 6 cho biết rằng, 2 cạnh của phôi theo chiều dọc liên kết có chuyển vị dương theo phương Z nghĩa là các cạnh này bị cong lên sau khi hàn. Lượng dịch chuyển lớn nhất theo phương Z của các cạnh này khi hàn ở các phương án PA2, PA3 và PA4 lần lượt là 0,23 mm, 0,22 mm và 0,21mm.

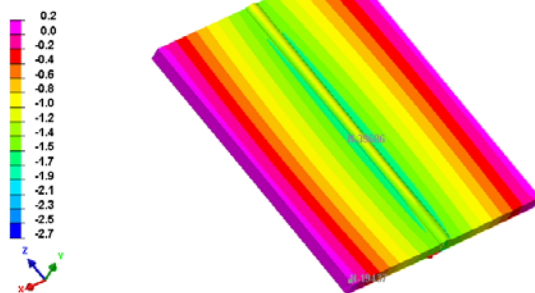
Đi từ 2 cạnh dọc của liên kết về phía mối hàn, dễ dàng nhận thấy giá trị của chuyển vị theo phương Z tăng lên đáng kể, nhưng mang dấu âm, nghĩa là chiều của chuyển vị ngược với chiều của trục Z. Chuyển vị âm ở đây thể hiện rằng các tấm phôi bị trũng xuống. Lượng chuyển vị lớn nhất theo phương Z trong liên kết được xác định tại vị trí đáy của mối hàn ở tâm của liên kết. Khi hàn với các mức năng lượng đường khác nhau ở các phương án hàn PA2, PA3 và PA4 thì chuyển vị lớn nhất theo phương Z lần lượt là 2,814 mm, 2,726 mm và 2,622 mm. Với kết cấu giáp mỗi 2 tấm, chuyển vị theo phương Z càng ít thì biến dạng góc của liên kết sẽ càng nhỏ.

BUTT_MAG_16MM_4PART
Kinematics : Displacement Y
Min = -2.01359 at Node 39653
Max = 0.229434 at Node 19437



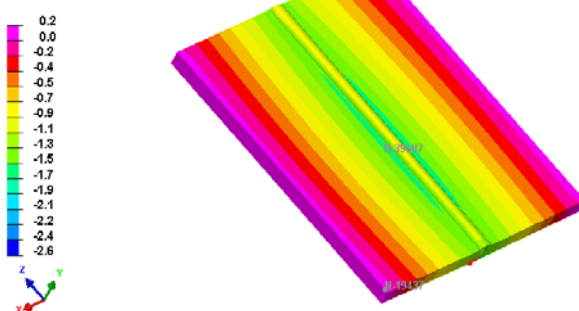
a) Phương án hàn PA2

BUTT_MAG_16MM_4PART
Kinematics : Displacement Y
Min = -2.72672 at Node 39686
Max = 0.219218 at Node 19437



b) Phương án hàn PA3

BUTT_MAG_16MM_4PART
Kinematics : Displacement Y
Min = -2.62218 at Node 39587
Max = 0.209293 at Node 19437



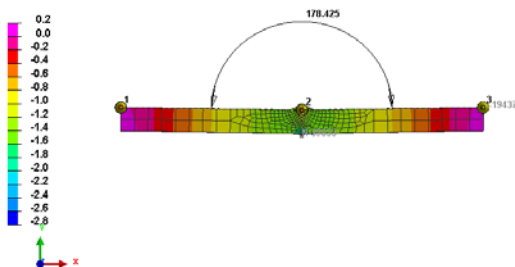
c) Phương án hàn PA4

Hình 6. Chuyển vị theo hướng chiều dày của liên kết giáp mỗi ở các phương án hàn

Để xác định chính xác mức độ biến dạng góc của liên kết hàn khảo sát thì liên kết cần được hiển thị theo tiết diện ngang và sử dụng công cụ đo góc của môđun Visual-Viewer của phần mềm Sysweld. Kết

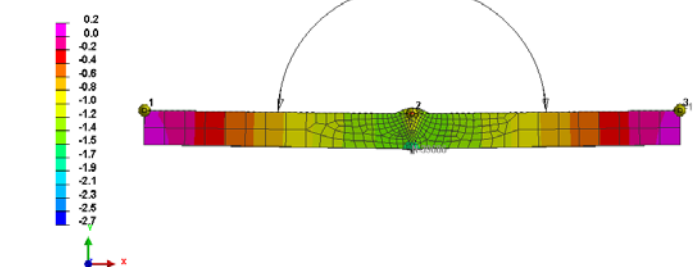
quả xác định biến dạng góc của liên kết hàn giáp mỗi khi hàn ở các phương án khác nhau được trình bày trong hình 7.

BUTT_MAG_16MM_4PART
Kinematics : Displacement Y
Min = -2.81309 at Node 39563
Max = 0.229434 at Node 19437



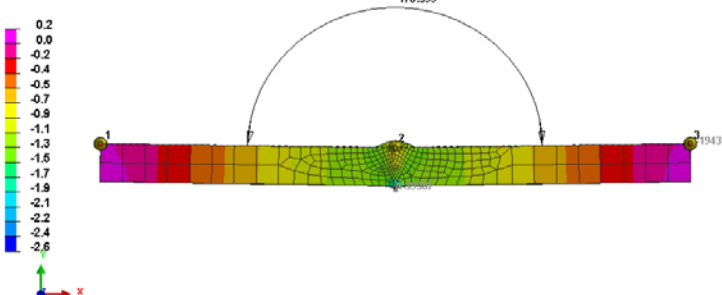
a) Phương án hàn PA2

BUTT_MAG_16MM_4PART
Kinematics : Displacement Y
Min = -2.72672 at Node 39566
Max = 0.219218 at Node 19437



b) Phương án hàn PA3

BUTT_MAG_16MM_4PART
Kinematics : Displacement Y
Min = -2.62218 at Node 39587
Max = 0.209293 at Node 19437



c) Phương án hàn PA4

Hình 7. Biến dạng góc của liên kết giáp mối ở các phương án hàn

Với liên kết giáp mối được ghép phẳng trước khi hàn (hình 1) thì góc tạo bởi 2 tấm phôi là 180° . Kết quả đo góc giữa 2 tấm sau khi đã hàn và làm nguội đến nhiệt độ môi trường trên hình 8 được tổng hợp trong bảng 5. Hiệu số giữa góc ghép phôi ban đầu và góc đo được sau khi hàn cho biết mức độ biến dạng góc của liên kết hàn. Từ kết quả xác định được trong bảng 5 cho thấy phương án hàn PA2 có mức độ biến dạng góc lớn nhất với giá trị $1,575^\circ$, còn khi hàn ở phương án PA3 thì biến dạng góc giảm còn $1,474^\circ$ trong khi đó nếu hàn ở phương án PA4 thì biến dạng góc là $1,401^\circ$. Điều này nói lên rằng khi tăng năng lượng đường lên thì mức độ co góc sẽ giảm xuống. Kết quả này phản ánh ngược với biến dạng dọc và biến dạng ngang đã xét ở trên.

Bảng 5. Biến dạng góc của liên kết giáp mối ở các phương án hàn

Phương án hàn	Góc đo được ($^\circ$)	Biến dạng góc ($^\circ$)
PA2	178,425	1,575
PA3	178,526	1,474
PA4	178,599	1,401

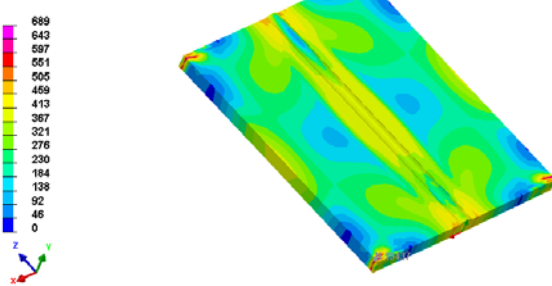
Tổng hợp các đánh giá về ứng suất dư, biến dạng dọc, biến dạng ngang và biến dạng góc của liên kết giáp mối 3 lớp 4 đường bằng thép cacbon kết cấu A516 grade 70, dễ dàng nhận thấy rằng phương án hàn PA2 với mức năng lượng đường nhỏ hơn sẽ cho ứng suất dư thấp hơn, biến dạng dọc và biến dạng ngang cũng thấp hơn. Chỉ có mỗi biến dạng góc là cao hơn 2 phương án hàn còn lại. Tuy nhiên mức độ chênh lệch về biến dạng góc của phương án PA2 so với các phương án PA3 và PA4 lần lượt chỉ là $0,101^\circ$ và $0,174^\circ$. Căn cứ vào các kết quả tính toán và so sánh này có thể khẳng định phương án

hàn PA2 là tốt hơn cả và phương án hàn PA2 sẽ được lựa chọn để thực hiện hàn liên kết trong thực tế.

Xét về trị số của ứng suất dư trong bảng 2, kể cả khi hàn ở phương án PA2 là phương án có ứng suất dư nhỏ nhất thì giá trị của chúng vẫn rất lớn. Điều này dẫn đến làm giảm nghiêm trọng khả năng chịu tải của mối nối. Từ đây nhu cầu phải tiến hành biện pháp xử lý nhiệt nhằm giảm ứng suất cho liên kết là cực kỳ cần thiết.

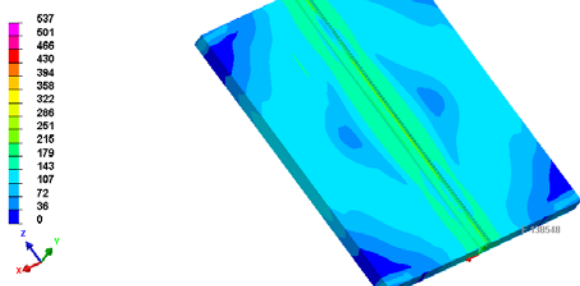
3.5. Ảnh hưởng của xử lý nhiệt sau hàn đến ứng suất dư trong liên kết hàn

BUTT_MAG_16MM_4PART
Stress : Stress_NOD Von Mises
Min = 10,8749 at Node 5115
Max = 688,864 at Node 19457



a) Không xử lý nhiệt sau hàn

BUTT_COOL
Stress : Stress_Von Mises
Min = 0 at Ele 135549
Max = 199,94 at Ele 6998



b) Có xử lý nhiệt sau hàn

Hình 8. Ứng suất dư trong liên kết hàn trước và sau khi xử lý nhiệt sau hàn

Kết quả tính toán ở mô hình có xử lý nhiệt sau khi hàn cho thấy ứng suất tương đương Von Mises lớn nhất tồn tại ở vị trí mối hàn với giá trị chỉ còn 199,94 MPa. So với trường hợp không xử lý nhiệt sau khi hàn (688,864 MPa) thì ứng suất dư trong liên kết đã giảm đi rất nhiều (giảm 488,924 MPa). Ứng suất trải đều trên phôi với chênh lệch ứng suất giữa các vùng là không lớn và có giá trị thấp nhất tại các vị trí gần sát với các vị trí kẹp phôi.

So sánh sự thay đổi ứng suất dư tương đương Von Mises lớn nhất trong liên kết hàn cho thấy rằng khi áp dụng kỹ thuật xử lý nhiệt sau khi hàn thì ứng suất dư đã giảm được 3,45 lần và ứng suất phân bố trong liên kết tương đối đồng đều chứ không còn chênh lệch lớn như trường hợp không xử lý nhiệt sau hàn. Kết quả này chắc chắn đã nâng cao được khả năng làm việc (chịu tải) cho liên kết hàn.

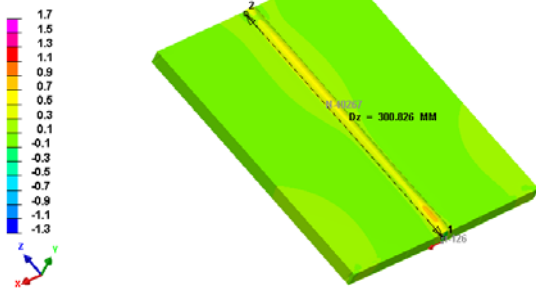
Theo tiêu chuẩn ASME VIII, liên kết hàn từ thép cacbon kết cấu A516 grade 70 cần được xử lý nhiệt ở 595 °C với thời gian ít nhất là 38,4 phút [10]. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này sẽ chọn chế độ xử lý nhiệt sau hàn cho liên kết nghiên cứu là: nhiệt độ nung 595 °C và thời gian giữ nhiệt 40 phút.

Liên kết hàn ngay sau khi được hàn xong tiếp tục được nung đến 595 °C và giữ ở nhiệt độ đó trong 40 phút, sau đó để nguội đến nhiệt độ của môi trường (30 °C). **Do kích thước của liên kết hàn tương đối nhỏ nên có thể thực hiện trong lò nhiệt luyện thông thường.** Kết quả tính toán ứng suất dư tương đương Von Mises phân bố trong liên kết hàn được thể hiện trong hình 8 dưới đây.

3.6. Ảnh hưởng của xử lý nhiệt sau hàn đến biến dạng của liên kết hàn

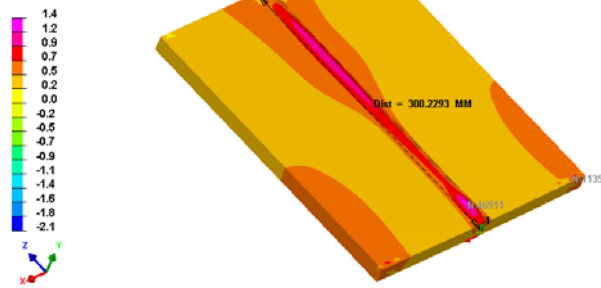
Kết quả đo kích thước dọc của liên kết hàn trong 2 trường hợp không xử lý nhiệt sau hàn và có xử lý nhiệt sau hàn được thể hiện trên hình 9. So với kích thước dọc của phôi ban đầu là 300 mm, trường hợp không áp dụng xử lý nhiệt sau hàn thì kích thước dọc của liên kết tăng lên 0,826 mm, trong khi đó nếu áp dụng xử lý nhiệt sau hàn thì kích thước dọc của liên kết chỉ tăng 0,2293 mm. Việc áp dụng xử lý nhiệt sau hàn sẽ giảm đáng kể độ biến dạng dọc của liên kết và theo kết quả tính toán thì độ dãn dọc của liên kết hàn giảm khoảng 2,82 lần so với trường hợp không xử lý nhiệt sau hàn. Như vậy việc xử lý nhiệt sau hàn không chỉ làm giảm ứng suất dư mà còn giảm được độ dãn dọc cho liên kết hàn.

BUTT_MAG_16MM_4PART
Kinematics : Displacement Z
Min = -0.192189 at Node 126
Max = 1.27478 at Node 40267



a) Không xử lý nhiệt sau hàn

BUTT_COOL
Kinematics : Displacement Z
Min = 0.266181 at Node 1135
Max = 1.39224 at Node 46911



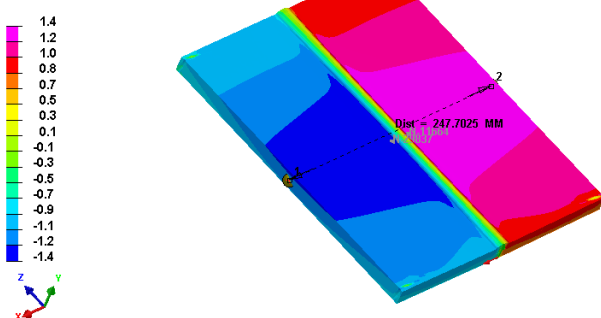
b) Có xử lý nhiệt sau hàn

Hình 9. Kích thước dọc của liên kết hàn ở các trường hợp không và có xử lý nhiệt sau hàn

Kết quả đo kích thước ngang của liên kết hàn ở 2 trường hợp có áp dụng xử lý nhiệt sau hàn và không xử lý nhiệt sau hàn được thể hiện trên hình 10. So với kích thước ngang của phôi ban đầu là 250 mm, trường hợp không áp dụng xử lý nhiệt sau hàn thì kích thước ngang của liên sau khi hàn và làm nguội xuống nhiệt độ 30 °C là 247,7025 mm (bị giảm 2,2975 mm), trong khi đó nếu áp dụng kỹ thuật xử lý nhiệt sau hàn thì kích thước ngang đo được của liên

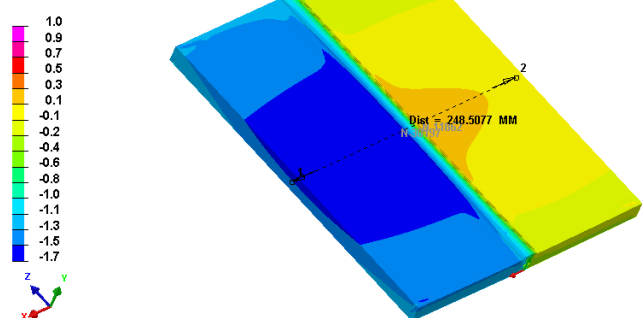
kết hàn là 248,5077 mm (bị giảm 1,4923 mm). So sánh 2 trường hợp này dễ dàng nhận thấy nếu áp dụng xử lý nhiệt sau hàn thì độ co ngang của liên kết giảm khoảng 1,54 lần, hay nói cách khác liên kết hàn sẽ ít bị co ngang dẫn đến hụt kích thước hơn nếu áp dụng kỹ thuật xử lý nhiệt sau hàn. Như vậy việc xử lý nhiệt sau hàn không chỉ làm giảm ứng suất dư, giảm độ dư thừa mà còn giảm được cả độ co ngang cho liên kết hàn.

BUTT_MAG_16MM_4PART
Kinematics : Displacement X
Min = -1.42787 at Node 29637
Max = 1.40559 at Node 11664



a) Không xử lý nhiệt sau hàn

BUTT_COOL
Kinematics : Displacement X
Min = -1.68857 at Node 30197
Max = 0.199097 at Node 11862



b) Có xử lý nhiệt sau hàn

Hình 10. Kích thước ngang của liên kết hàn ở các trường hợp không và có xử lý nhiệt sau hàn

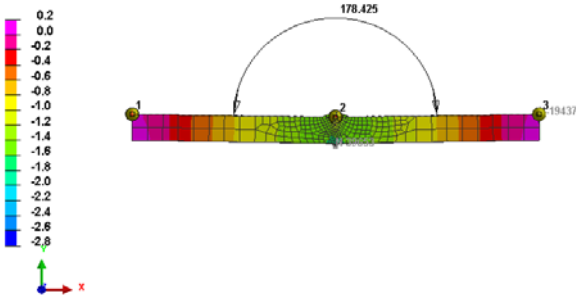
Kết quả đo kích thước góc của liên kết hàn ở 2 trường hợp có áp dụng xử lý nhiệt sau hàn và không xử lý nhiệt sau hàn được thể hiện trên hình 11. So với góc ban đầu của 2 tấm phôi là 180°, trường hợp không áp dụng xử lý nhiệt sau hàn thì góc giữa 2 tấm phôi của liên sau khi hàn và làm nguội xuống

nhiệt độ 30°C là 178,425° (bị giảm 1,575°), trong khi đó nếu áp dụng kỹ thuật xử lý nhiệt sau hàn thì góc giữa 2 tấm phôi sau khi kết thúc làm nguội là 178,808° (bị giảm 1,192°). Dễ dàng nhận thấy rằng nếu áp dụng xử lý nhiệt sau hàn thì độ biến dạng góc của liên kết sẽ giảm khoảng 1,32 lần so với

trường hợp không xử lý nhiệt sau hàn. Như vậy việc xử lý nhiệt sau hàn không chỉ làm giảm được ứng

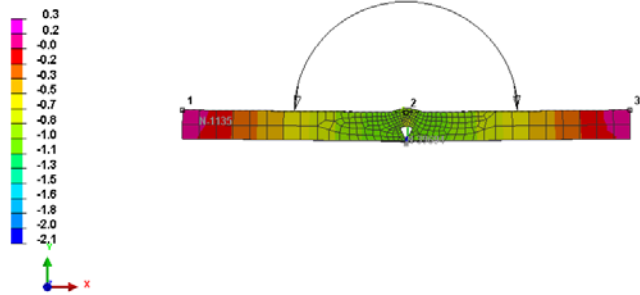
suất dư, giảm độ duỗi dọc, giảm độ co ngang mà còn giảm được cả độ co góc cho liên kết hàn.

BUTT_MAG_16MM_4PART
Kinematics : Displacement Y
Min = -2.81359 at Node 39653
Max = 0.229434 at Node 19437



a) Không xử lý nhiệt sau hàn

BUTT_COOL
Kinematics : Displacement Y
Min = -1.98599 at Node 39694
Max = 0.0441658 at Node 1135



b) Có xử lý nhiệt sau hàn

Hình 11. Kích thước góc của liên kết hàn ở các trường hợp không và có xử lý nhiệt sau hàn

Tổng hợp các kết quả tính toán về ứng suất dư, biến dạng dọc, biến dạng ngang và biến dạng góc của liên kết hàn, dễ dàng thấy rằng nếu áp dụng kỹ thuật xử lý nhiệt sau hàn thì sẽ giảm được cả ứng suất dư, biến dạng dọc, biến dạng ngang và biến dạng góc của liên kết hàn, trong đó mức độ giảm ứng suất dư là lớn nhất (3,45 lần), tiếp đến là biến dạng dọc (2,82 lần), biến dạng ngang (1,54 lần) và cuối cùng là biến dạng góc (1,32 lần).

Sở dĩ có được các kết quả này là bởi vì khi đang hàn và ngay sau khi kết thúc hàn thì chênh lệch nhiệt độ giữa vùng mối hàn và các vùng xung quanh là rất lớn gây ra ứng suất trong liên kết sẽ lớn. Ứng suất là nguyên nhân gây ra biến dạng nên ứng suất trong liên kết mà lớn thì tất yếu sẽ gây ra biến dạng lớn cho liên kết. Nếu ngay khi kết thúc hàn đường cuối cùng, liên kết không để nguội tự nhiên trong không khí mà được xử lý nhiệt ngay (ủ ở 595 °C trong 40 phút) thì chênh lệch nhiệt độ giữa các vùng trong liên kết sẽ không còn lớn. Kết quả là ứng suất trong liên kết sẽ nhỏ dẫn đến các biến dạng của liên kết cũng sẽ nhỏ.

4. KẾT LUẬN

Kết quả tính toán ảnh hưởng của năng lượng đường và xử lý nhiệt sau hàn đến ứng suất dư và biến dạng của liên kết hàn giáp mối 3 lớp 4 đường

bằng thép cacbon kết cấu A516 grade 70 mang lại những kết luận quan trọng dưới đây.

Nếu kẹp chặt phôi thì ứng suất dư tại vị trí kẹp chặt sẽ rất lớn. Đối với các vật liệu mềm thì không nên kẹp chặt mà nên kẹp đàn hồi như cơ cấu lò xo ép chẳng hạn.

Khi hàn với năng lượng đường càng lớn hay nhiệt lượng cấp vào vùng hàn càng cao thì ứng suất dư trong liên kết hàn sẽ càng lớn, gây ra biến dạng dọc và biến dạng ngang cho liên kết cũng lớn theo. Chỉ có biến dạng góc là theo chiều ngược lại nhưng ảnh hưởng của năng lượng đường đến biến dạng góc là không lớn. Do vậy đối với liên kết hàn giáp mối thì nên hàn ở mức năng lượng đường càng nhỏ càng tốt, tuy nhiên phải đủ ngẫu để hình thành được liên kết. Phương pháp mô phỏng số sẽ xác định được giá trị năng lượng đường hợp lý với mức chi phí thấp nhất và thời gian nhanh nhất.

Ứng suất dư và biến dạng luôn luôn tồn tại trong liên kết hàn do việc nung nóng và làm nguội không đều giữa các vùng của liên kết, cũng như do quá trình biến đổi pha trong liên kết gây ra. Giá trị của ứng suất dư và biến dạng trong liên kết hàn thường rất lớn làm giảm nghiêm trọng khả năng làm việc của kết cấu, đồng thời gây thiếu hụt kích thước và làm méo mó, mất tính thẩm mỹ của kết cấu. Để khắc

phục nhược điểm này thì liên kết hàn có thể được xử lý nhiệt ở một chế độ hợp lý đối với từng loại thép. Đối với liên kết giáp mối bằng thép cacbon kết cấu A516 grade 70, việc xử lý nhiệt ngay sau khi hàn ở nhiệt độ 595°C trong thời gian 40 phút sẽ làm giảm

được ứng suất dư 3,45 lần, giảm biến dạng dọc 2,82 lần, giảm biến dạng ngang 1,54 lần và giảm biến dạng góc khoảng 1,32 lần so với trường hợp không xử lý nhiệt sau hàn.

TÀI LIỆU TRÍCH DẪN

1. Zhili Feng, *Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge CB1 6AH, England, 2005.
2. Prev y Paul S., *X-ray Diffraction Residual Stress Techniques*, Metals Handbook. 10. Metals Park: American Society for Metals, 1986, pp. 380-392.
3. American Welding Society, *AWS D1.1: 2015 - Structural Welding Code – Steel*. 550N.W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126, 2015.
4. Ng  L  Th ng, *C ng ngh  hàn  i n n ng ch y – T p 1: C  sở lý thuyết*, Nxb Khoa học và K  thuật, H  N i, 2005.
5. Rada , D., *Schweissprozess- Simulation Grundlagen und Anwendungen*. Fachbuchreihe Schweisstechnik, DVS Verlag, 1999.
6. Ng  L  Th ng, *C ng ngh  hàn  i n n ng ch y – T p 2:  ng d ng*, Nxb Khoa học và K  thuật, H  N i, 2007.
7. ESI Group, *Sysweld 2017 Reference manual*, January 2017.
8. V  Đ nh To i, *Ph n t ch tr ng n i t    v  chuyển bi n pha b ng m  ph ng s  khi hàn thép cacbon kết cấu A516 grade 70*, T p ch  Khoa học – C ng ngh  Kim loại, S  100, Th ng 2/2022.
9. International Standard Organization, *ISO 15614-1: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys*, Second edition, ISO copyright office, CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland, 2017.
10. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, *SECTION VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels*, 2015 edition, The American Society of Mechanical Engineers, Two Park Avenue, New York, NY 10016-5990, 2015.