

The Effect of Phase Transformation on Residual Stress During Welding of EN 10025-2 Steel Pipe by Numerical Simulation

Hong Thanh Nguyen^{*}, Van Hong Mai^{*}
Nam Dinh University of Technology Education, Vietnam

^{*}Corresponding author. Email: nhthanh@nute.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 23/06/2026
Revised: 16/07/2026
Accepted: 04/08/2026
Online First: 25/08/2026
Published:

KEYWORDS

EN 10025-2 steel;
Phase transformation;
Temperature;
Residual stress;
Numerical simulation.

ABSTRACT

Temperature field plays a role in the phase transformation of steel and influences the residual stress. Experimental temperature measurement during welding is difficult, costly, and harmful to the health of the welders. This study uses SYSWELD software to determine the temperature field, residual stress, and phase transformation during welding of EN 10025-2 carbon steel pipe joint with an outer diameter $D = 150$ mm, inner diameter $d = 140$ mm, and a length of 100 mm. The welding thermal cycle influences the formation of structures such as mactenxit and bainite, and also affects the workability of the welded structure. In the weld seam and heat affected zone (HAZ), bainite transformation reached 84%. At the beginning and end of the weld seam, the bainite content was 53% and mactenxit was 46.6%. Meanwhile, the austenite concentration was very low, about 0.18%. The high content of bainite and mactenxit (these are two hard and brittle phases) results in residual tensile stress in the X-direction of 499 MPa and in the Y-direction of 526 MPa, which are higher than the material's yield strength, potentially causing cracks to appear during operation.

Ảnh hưởng của chuyển biến pha đến ứng suất dư khi hàn ống thép EN 10025-2 bằng mô phỏng số

Nguyễn Hồng Thanh^{*}, Mai Văn Hồng^{*}
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định, Việt Nam

^{*}Tác giả liên hệ. Email: nhthanh@nute.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 23/06/2026
Ngày hoàn thiện: 16/07/2026
Ngày chấp nhận đăng: 04/08/2026
Ngày đăng trực tuyến: 25/08/2026
Ngày xuất bản:

TỪ KHÓA

Thép EN 10025-2;
Chuyển biến pha;
Nhiệt độ;
Ứng suất dư;
Mô phỏng số.

TÓM TẮT

Trường nhiệt độ giữ vai trò qua trọng trong quá trình chuyển biến pha của thép và ảnh hưởng đến quá trình hình thành ứng suất dư. Việc thực nghiệm đo nhiệt độ khi hàn gặp nhiều khó khăn, tốn kém về kinh tế và ảnh hưởng tới sức khỏe của người thợ. Trong nghiên cứu này, sử dụng phần mềm SYSWELD để xác định trường nhiệt độ, ứng suất dư cũng như chuyển biến pha khi hàn đối đầu ống thép cacbon EN 10025-2 có đường kính ngoài $D = 150$ mm; đường kính trong $d = 140$ mm và chiều dài mỗi ống là 100 mm. Chu trình nhiệt hàn có ảnh hưởng tới sự hình thành các tổ chức như mactenxit và bainite, đồng thời cũng ảnh hưởng tới khả năng làm việc của kết cấu hàn. Ở khu vực đường hàn và vùng ảnh hưởng nhiệt (AHN) chuyển biến bainite đạt 84%. Tại điểm bắt đầu và kết thúc đường hàn hàm lượng bainite đạt 53% và mactenxit là 46,6%; trong khi đó nồng độ austenite là rất nhỏ khoảng 0,18%. Với hàm lượng bainite và mactenxit (đây là 2 pha cứng và giòn) cao dẫn đến ứng suất dư kéo theo phương X là 499 MPa và phương Y là 526 MPa cao hơn so với giới hạn chảy của vật liệu, điều này có thể xuất hiện các vết nứt trong quá trình làm việc.

DOI: <https://doi.org/10.54644/jte.2026.2512>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

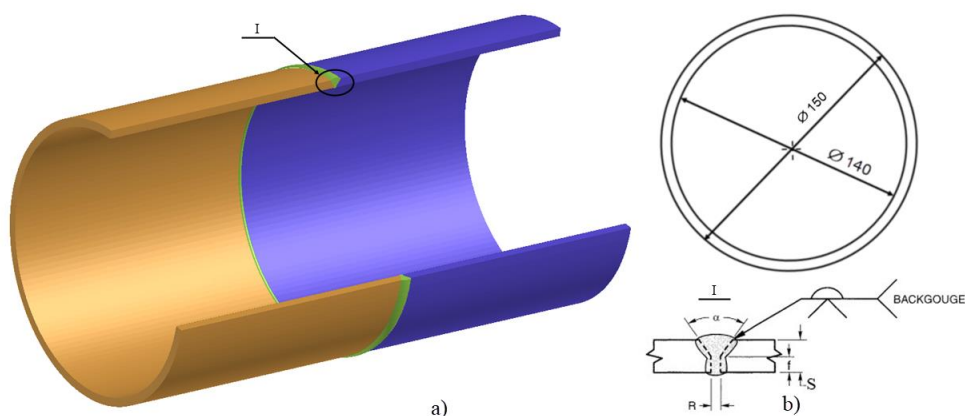
Thép cacbon EN 10025-2 dùng để chế tạo các bộ phận, chi tiết trong ngành công nghiệp thực phẩm, hóa chất và y tế cũng như các phương tiện giao thông vận tải, cơ khí vì có những đặc tính vượt trội như: độ bền cao, tính dẻo dai, khả năng chịu ăn mòn trong môi trường khắc nghiệt và tuổi thọ cao [1], [2]. Trong quá trình hàn ứng suất dư bị ảnh hưởng bởi quá trình chuyển biến mactenxit [3], Vũ Đình Toại cũng đã nghiên cứu mô phỏng chuyển biến pha bằng mô phỏng số khi hàn thép các bon kết cấu A516 grade 70 [4]. Y. Cui và cộng sự cũng có các nghiên cứu ảnh hưởng của chuyển biến pha đến ứng suất dư khi hàn thép mactenxit. Ứng suất dư được tạo ra trong quá trình hàn ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định kích thước, độ bền mỏi, khả năng chống ăn mòn ứng suất và khả năng chống nứt của chi tiết [5]. Do đó, việc dự đoán chính xác sự phân bố ứng suất dư là rất quan trọng. Phương pháp thực nghiệm chỉ có thể đo ứng suất dư cục bộ tại một vị trí nào đó điều này gặp một số hạn chế. Trường ứng suất dư có thể phân tích và dự đoán được thông qua mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH). Mô hình ứng suất dư có tính đến sự biến đổi mactenxit là rất quan trọng để dự báo chính xác ứng suất dư, từ đó rất cần thiết để tối ưu hóa chế độ nhiệt trong hàn [6], [7].

Việc chuyển biến austenite-mactenxit từ pha lỏng sang rắn khi nguội có ảnh hưởng đáng kể tới quá trình hình thành ứng suất dư và biến dạng [8]. Việc chuyển biến mactenxit là chuyển biến không khuếch tán, nguyên tử cacbon hầu như giữ nguyên vị trí, còn sắt dịch chuyển vị trí để tạo kiểu mạng mới, mạng chính phương tâm khối. Các nguyên tử cacbon nằm xen kẽ trong kiểu mạng ở vị trí các lỗ hổng bát diện được tạo ra từ các nguyên tử sắt, như vậy mactenxit là dung dịch rắn xen kẽ quá bão hoà của cacbon trong Fe_α có kiểu mạng chính phương khối so với ferrite có kiểu mạng lập phương tâm khối. Thành phần hóa học của mactenxit được kế thừa trực tiếp từ austenite. Theo các nghiên cứu của Kurdjumov–Sachs và Nishiyama–Wassermann thì giữa mạng tinh thể mactenxit được tạo ra và austenite ban đầu có mối quan hệ chặt chẽ với nhau: austenite và mactenxit có mặt và phương song song với nhau [9].

Dự đoán chính xác sự phân bố ứng suất dư và biến dạng là rất cần thiết để cải thiện chất lượng của các kết cấu hàn. Đối với một số loại thép, để đánh giá chính xác ứng suất dư và biến dạng, phải xét đến sự biến đổi pha luyện kim khi đông đặc. Trong nghiên cứu này, sử dụng phần mềm SYSWELD [10] trong thiết kế mô hình; tính toán, mô phỏng sự biến đổi pha từ lỏng sang rắn, đồng thời xác định ứng suất dư và biến dạng trong quy trình hàn hồ quang điện cực nóng chảy trong môi trường khí trơ thép cacbon EN 10025-2.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình liên kết hàn giáp mối

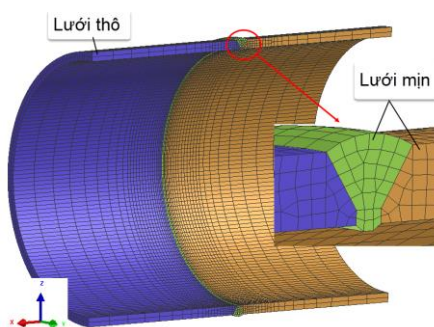


Hình 1. a) Mô hình hàn đối đầu hai ống thép – 3D, b) thông số mối ghép – 2D.

Mô hình mô phỏng có kích thước: đường kính ngoài $D = 150$ mm; đường kính trong $d = 140$ mm; chiều dài mỗi ống là 100 mm, Hình 1a. Theo bảng 3.4, trang 107 [11], quy phạm hàn kết cấu thép của Hiệp hội hàn Mỹ AWS D1.1 trong trường hợp hàn giáp mối, ngẫu suất; các thông số mối ghép được thể hiện như Hình 1b: chiều dày thành ống $S = 5$ mm, khe hở lắp ghép $R = 3$ mm, lượng dư gia công $f = 2-3$ mm, góc vát $\alpha = 57 \pm 3^\circ$.

2.2. Mô hình phần tử hữu hạn

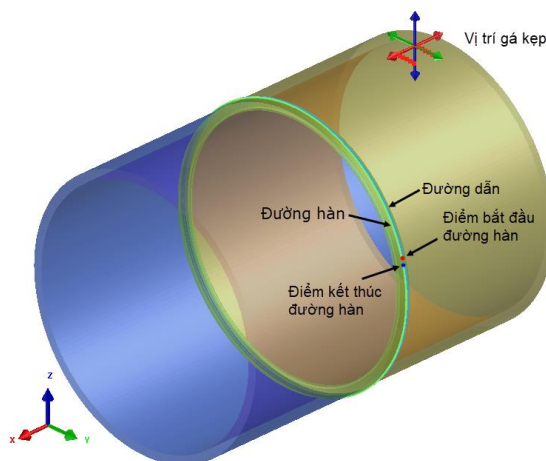
Trong mô phỏng số trường ứng suất và biến dạng với phần tử khối - 3D Solid, theo khuyến cáo hướng dẫn sử dụng phần mềm [10] nên sử dụng các loại phần tử HEXA/PENTA và hạn chế sử dụng phần tử TETRA và PYRAMID. Để đảm bảo tính chính xác của mô hình và thời gian tính toán nhanh nhất khu vực mối hàn và vùng AHN sử dụng lưới mịn; khu vực ở xa vùng chịu tác động của nhiệt độ cao dùng lưới thưa. Dạng lưới phần tử sử dụng trong mô hình này là kiểu Linear Hex 8 và Linear Penta 6, [12] mô hình PTHH 3D liên kết hàn được xây dựng dựa trên phần mềm VisualMesh được mô tả như trên Hình 2.



Hình 2. Mô hình PTHH liên kết hàn đối đầu ống.

2.3. Quỹ đạo đường hàn và các điều kiện biên

2.3.1. Quỹ đạo đường hàn và đường dẫn



Hình 3. Quỹ đạo đường hàn.

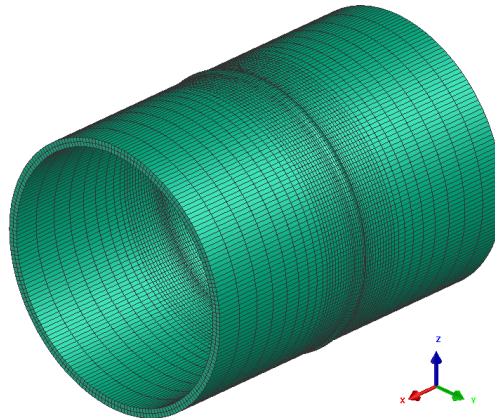
Liên kết hai ống thép đối đầu, mối hàn khép kín nên các đường hàn có quỹ đạo là đường tròn khép kín với điểm bắt đầu và cũng là điểm kết thúc hàn. Trong mô phỏng, với các đường hàn dạng này thì cần phải xây dựng quỹ đạo đường hàn và đường dẫn, nút bắt đầu và nút kết thúc. Kết quả xây dựng quỹ đạo các đường hàn được thể hiện ở Hình 3.

2.3.2. Lớp vỏ trao đổi nhiệt

Với bài toán mô phỏng hàn, điều kiện biên được xác định là sự truyền nhiệt bằng đối lưu và bức xạ giữa liên kết hàn với môi trường xung quanh thông qua lớp vỏ của liên kết hàn [10]. Mô hình lớp vỏ truyền nhiệt ra môi trường được tạo ra từ các phần tử 3D thành các phần tử mặt (2D) bao quanh phía ngoài của liên kết như Hình 4.

Trong hàn lượng nhiệt thất thoát ra môi trường xung quanh gồm: đối lưu và bức xạ nhiệt. Ở vùng bề hàn và vùng AHN, nơi có nhiệt độ cao thì bức xạ nhiệt là chính và giữ vai trò tản nhiệt ra môi trường. Vùng xa mối hàn nơi nhiệt độ thấp hơn thì sự đối lưu nhiệt đóng vai trò tản nhiệt chính. Bộ dữ liệu này

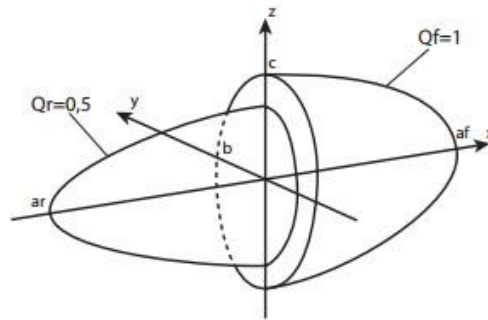
được tích hợp sẵn trong thư viện phần mềm SYSWELD, các hệ số được xác định bằng thực nghiệm tương ứng với các điều kiện truyền nhiệt cụ thể.



Hình 4. Lốp vỏ trao đổi nhiệt.

2.4. Mô hình nguồn nhiệt hàn

Mô hình nguồn nhiệt hàn thích hợp trong nghiên cứu này được đưa ra bởi Goldak và cộng sự [8] là Ellipsoid, Hình 5.



Hình 5. Mô hình nguồn nhiệt hàn.

Khi hồ quang hàn dịch chuyển sự phân bố nhiệt ở phía trước (Q_f) và phía sau (Q_r) tâm nguồn nhiệt được biểu diễn bởi công thức (1) và (2).

$$Q_r(x, y, z) = Q_r \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{a_f^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2}\right) \quad (1)$$

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

Ở công thức (1) và (2): a_f , a_r , b và c là các thông số hình học của nguồn nhiệt, Hình 5; Q_r là hàm mật độ nguồn nhiệt. Ở đây: f_f và f_r lần lượt là mật độ nguồn nhiệt ở phía trước và phía sau ($f_f + f_r = 2$).

Trong đó $f_f = \frac{2a_f}{a_f + a_r}$ và $f_r = \frac{2a_r}{a_f + a_r}$

Trong đó, Q là công suất nguồn nhiệt; $Q = \eta \times U \times I$

η là hiệu suất nguồn nhiệt; U là điện áp hồ quang hàn; I là cường độ dòng điện hàn.

Mô hình nguồn nhiệt và phần tử lưới trong mô phỏng cơ-nhiệt là giống nhau. Dữ liệu về nhiệt độ trong quá trình phân tích nhiệt được coi như một tải trọng đặt vào mỗi nút khi phân tích cơ học.

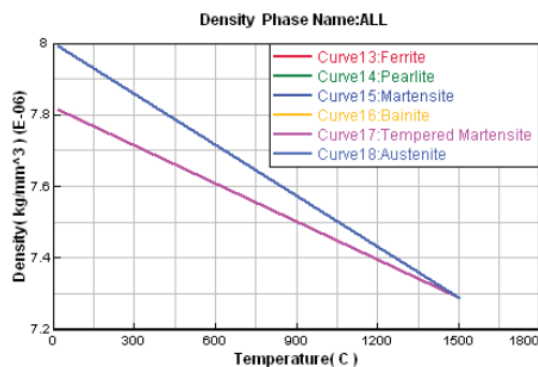
2.5. Thông số của vật liệu

Đặc trưng của các bài toán hàn/mô phỏng hàn là các thông số lý hóa của vật liệu thay đổi theo nhiệt độ và phụ thuộc vào thành phần pha của nó. Thông số vật liệu được xác định là kim loại cơ bản (KLCB) và kim loại bổ sung. Đặc tính của vật liệu sẽ quyết định đến việc lựa chọn các thông số hàn phù hợp cho vật liệu đó như trình bày trong Bảng 1.

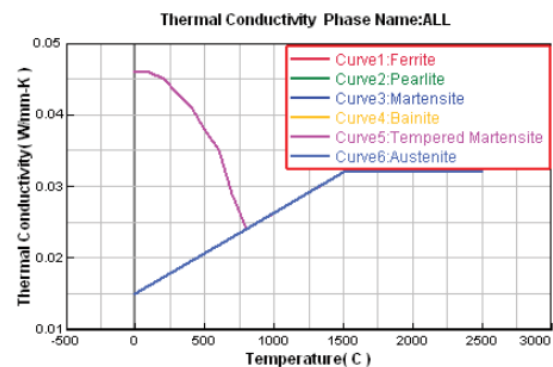
Bảng 1. Thành phần hóa học của thép EN 10025-2.

Thành phần hoá học, %				
C	Si	Mn	P	S
0,24	0,55	1,6	0,035	0,035

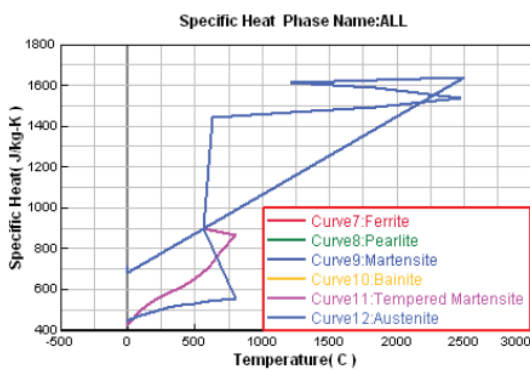
Thép EN10025-2 có giới hạn bền 470–630 MPa, giới hạn chảy ≥ 355 MPa, độ giãn dài tương đối khoảng 20% và nhiệt độ nóng chảy 1500°C.



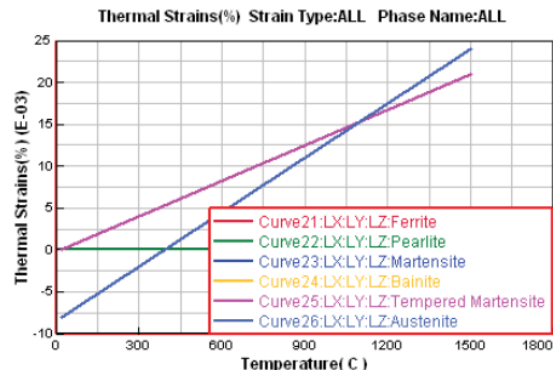
a) Khối lượng riêng



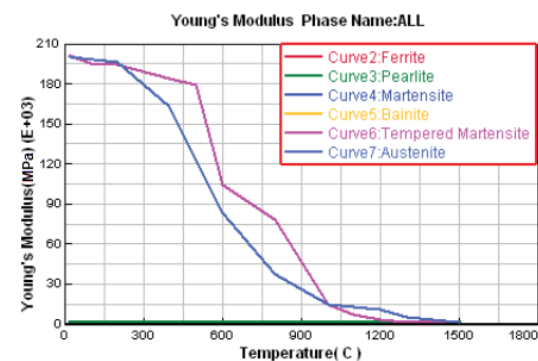
b) Hệ số dẫn nhiệt



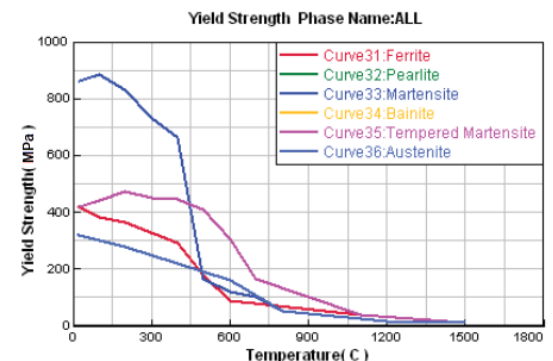
c) Nhiệt dung riêng



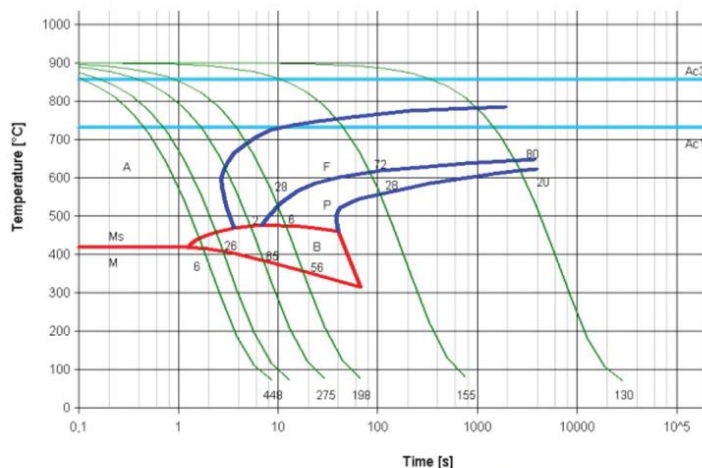
d) Hệ số biến dạng nhiệt



e) Mô đun đàn hồi



f) Giới hạn chảy



g) Giản đồ chuyển pha khi nguội liên tục (CCT diagram)

Hình 6. Các tính chất cơ-lý của thép EN10025-2.

Để tính toán và mô phỏng đồng thời các quá trình truyền nhiệt, chuyển pha và ứng xử cơ học trong quá trình hàn kim loại, việc cung cấp một bộ số liệu thuộc tính vật liệu phụ thuộc nhiệt độ là điều kiện bắt buộc. Bộ số liệu đặc tính vật liệu của thép EN 10025-2 sử dụng trong nghiên cứu này được thể hiện chi tiết tại Hình 6, trong đó:

Hình 6a: Khối lượng riêng (kg/mm^3); Hình 6b: Hệ số dẫn nhiệt ($\text{W/m}\cdot\text{K}$); Hình 6c: Nhiệt dung riêng ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$); Hình 6d: Biến dạng nhiệt tương đối (%); Hình 6e: Mô đun đàn hồi (MPa); Hình 6f: Giới hạn chảy (MPa) (đều phụ thuộc vào nhiệt độ); Hình 6g: Giản đồ chuyển biến pha khi làm nguội liên tục (giản đồ CCT) theo thời gian.

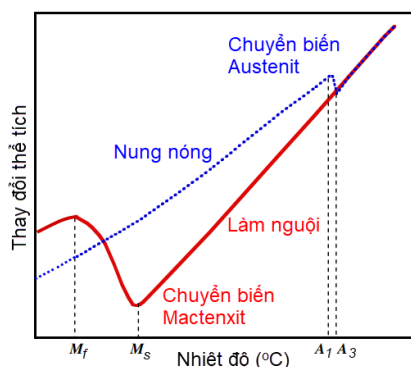
2.6. Chuyển biến pha

Để phân tích quá trình luyện kim trên cơ sở quá trình chuyển biến pha khi hàn thì KLCB được nung nóng trên nhiệt độ A_1 , ở nhiệt độ này xementit không xuất hiện trong khi đó pearlite và ferrite sẽ chuyển một phần thành austenite. Khi nhiệt độ lớn hơn A_3 , pearlite và ferrite chuyển hoàn toàn sang austenite. Nhiệt độ A_1 và A_3 được xác định theo công thức (3) và (4) [13]:

$$A_1 = 723 - 10,7\text{Mn} - 16,9\text{Ni} + 29\text{Si} + 16,9\text{Cr} + 290\text{As} + 6,4\text{W} \quad (3)$$

$$A_3 = 912 - 203\sqrt{C} - 15,2\text{Ni} + 44,7\text{Si} + 104\text{V} + 31,5\text{Mo} + 13,1\text{W} - 30\text{Mn} - 11\text{Cr} - 20\text{Cu} + 700\text{P} + 400\text{Al} + 120\text{As} + 400\text{Ti} \quad (4)$$

Trong đó, hàm lượng các nguyên tố được tính theo %, với C: cacbon; Mn: mangan; Ni: niken; Si: silic; Cr: crom; As: arsenic; W: vonfram; V: vadini; Mo: molipden; Cu: copper; Al: aluminum; Ti: titan; P: photpho.



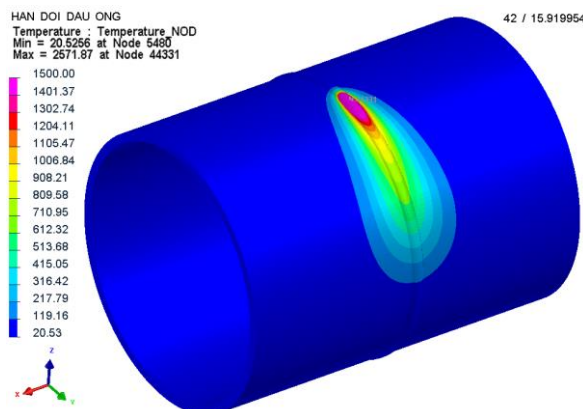
Hình 7. Mối quan hệ giữa thể tích và chuyển biến pha.

Khi kim loại cơ bản được nung nóng trên nhiệt độ A1, cấu trúc lập phương tâm khối chuyển sang cấu trúc lập phương tâm diện và thể tích giảm. Trong quá trình làm nguội nhanh, austenite có cấu trúc lập phương tâm diện chuyển thành mactenxit có cấu trúc tứ giác tập trung vào vật thể và thể tích tăng lên. Sự thay đổi thể tích do chuyển biến pha khi nung nóng và làm nguội được thể hiện dưới dạng sơ đồ như trong Hình 7 [14], [15].

3. Kết quả và bàn luận

Trong nghiên cứu này, thông số chế độ hàn chọn $I = 260$ A, $U = 28$ V, vận tốc hàn chọn 5 mm/s, $\eta = 0,85$. Tương ứng với thông số nguồn nhiệt: $a_f + a_r = 10$ mm, $b = 7$ mm, $c = 5$ mm; năng lượng đường $q = 1200$ J/mm.

3.1. Trường nhiệt độ

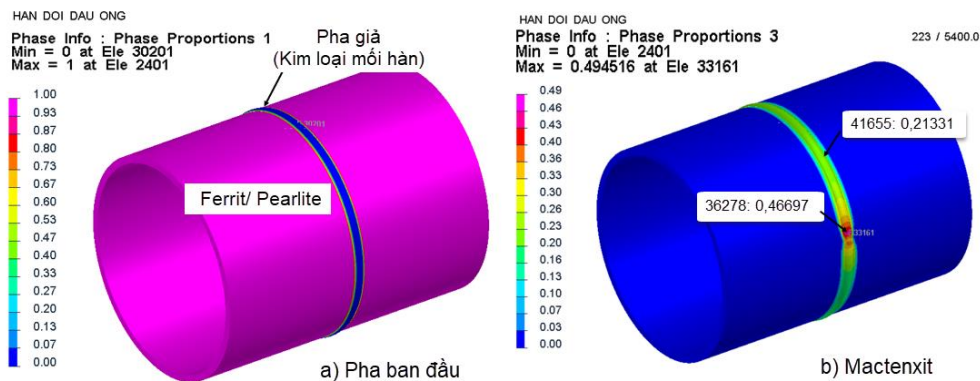


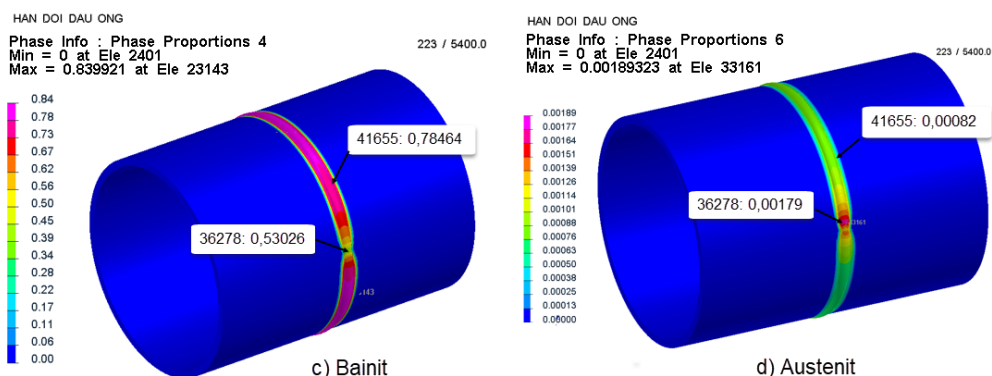
Hình 8. Trường nhiệt độ.

Phân tích trường nhiệt độ hàn sẽ xác định được kích thước của bề hàn và chiều sâu nóng chảy, qua đó sẽ đánh giá được khả năng ngẫu của KLCB cũng như một số khuyết tật khác: cháy thùng, cháy cạnh, bỏ chân mối hàn. Hình 8 cho thấy sự phân bố nhiệt độ khi hàn giáp mối đối đầu hai ống thép các bon có chiều dày 5 mm. Dựa vào phổ màu ta thấy nhiệt độ bề hàn trên bề mặt tại nút 44331 vào khoảng 2572 °C, càng ra xa nhiệt độ càng giảm. Tổng thời gian hàn và làm nguội là 5400 s (tương đương 1,5 giờ) nhiệt độ vật hàn giảm xuống 30 °C.

3.2. Chuyển biến pha

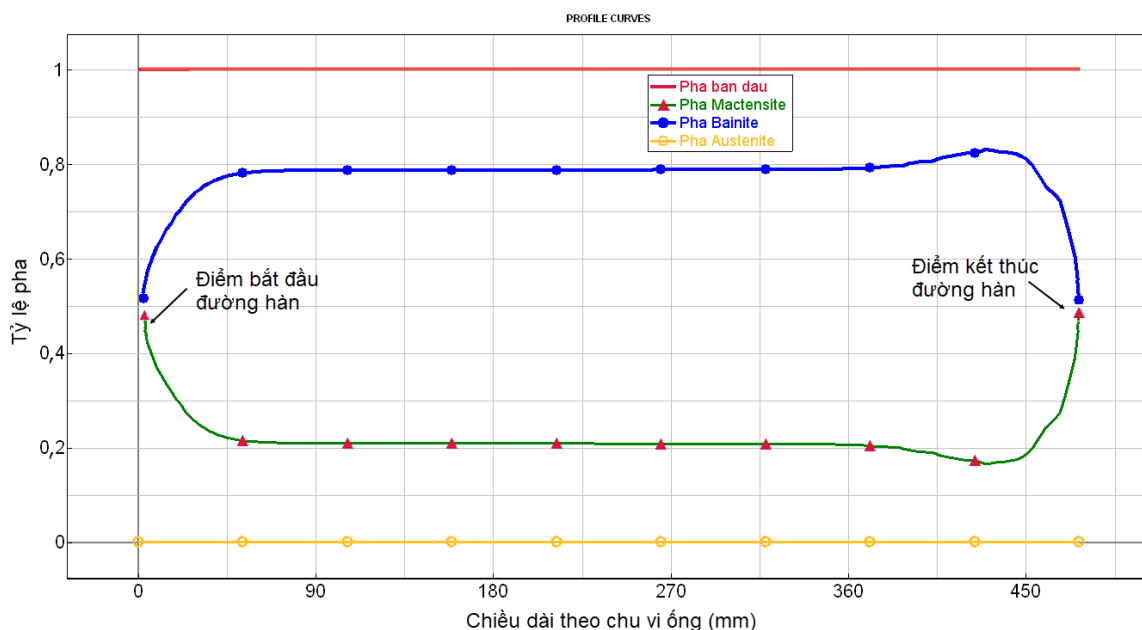
Khi hàn thép cacbon có thể sinh ra các tổ chức mactenxit hay bainite (cứng và giòn) ở vùng AHN và kim loại mối hàn, tùy thuộc vào tốc độ nguội của mối hàn nếu quá nhanh sẽ ảnh hưởng tới khả năng xuất hiện tổ chức tế vi không mong muốn làm ảnh hưởng tới khả năng làm việc của liên kết hàn [12]. Theo tính toán thì thời gian làm nguội ($t_{8/5}$) từ 800°C đến 500°C khoảng 20 s, như vậy với tốc độ nguội là 15 °C/s thép hoàn toàn chuyển biến sang bainite. Từ sơ đồ chuyển đổi làm nguội liên tục, Hình 6g, có thể thu được mối quan hệ giữa tốc độ làm nguội và tỷ lệ mactenxit. Việc nghiên cứu quá trình chuyển pha sẽ biết được khả năng xuất hiện các tổ chức trong liên kết hàn.





Hình 9. Chuyển biến pha sau hàn.

Dựa vào cơ sở dữ liệu trong phần mềm SYSWELD pha nền của thép EN 10025-2 là ferrite/ pearlite như mô tả ở Hình 9a. Kết quả mô phỏng tổ chức pha mactenxít được mô tả như Hình 9b; tổ chức bainite được thể hiện trên Hình 9c và Hình 9d thể hiện tổ chức của pha austenite. Theo quan sát nút 36278 ở vị trí bắt đầu và kết thúc đường hàn tổ chức mactenxít chiếm 46,697% và tổ chức bainite đạt giá trị 53,026% được mô tả trên Hình 9b và Hình 9c. Cũng trên Hình 9b và Hình 9c nhận thấy tại nút 41665 nồng độ mactenxít vào khoảng 21,4% còn nồng độ bainite có giá trị khoảng 78,5%. Hình 9d cho thấy nồng độ austenite ở đường hàn khoảng 0,082%, tại điểm bắt đầu và kết thúc khoảng 0,18%.



Hình 10. Đồ thị pha kim loại trước và sau hàn.

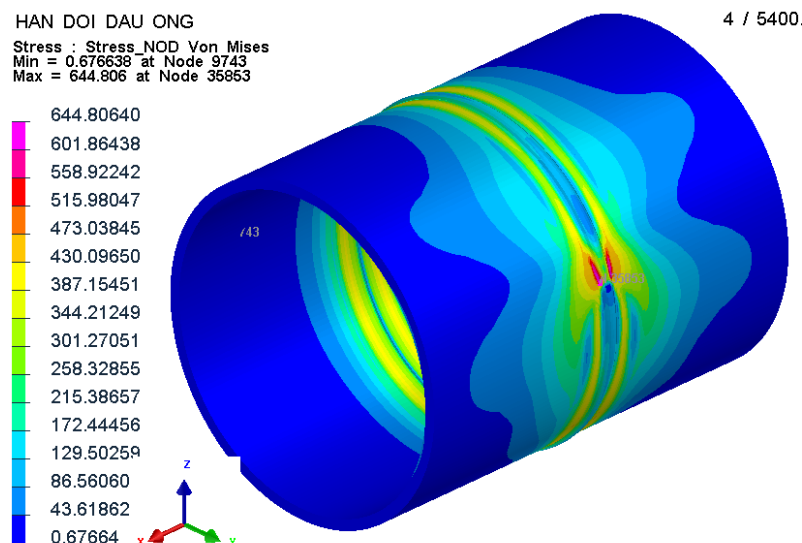
Đồ thị các pha kim loại trước và sau hàn được biểu diễn trên Hình 10, ở pha ban đầu, hàm lượng Ferrit/Pearlite là 100%.

Khi bắt đầu hàn ở khu vực giữa đường hàn nồng độ bainite tăng dần đạt giá trị khoảng 80%, đến khoảng 400 mm tính từ điểm bắt đầu đường hàn hàm lượng bainite tăng và đạt giá trị cao nhất khoảng 84% tại vị trí 430 mm và giảm xuống khoảng 50% ở vị trí kết thúc đường hàn. Trong khi đó mactenxít ở điểm bắt đầu đường hàn cao sau đó giảm dần xuống 20% cách đầu đường hàn khoảng 45 mm. Tới vị trí khoảng 400 mm hàm lượng mactenxít bắt đầu giảm xuống khoảng 16%, sau đó tăng lên ở vị trí kết thúc đường hàn như mô tả ở Hình 10. Hàm lượng austenite ở đường hàn là tương đối nhỏ vào khoảng 0,2%.

3.3. Ứng suất dư

3.3.1. Ứng suất Von Mises

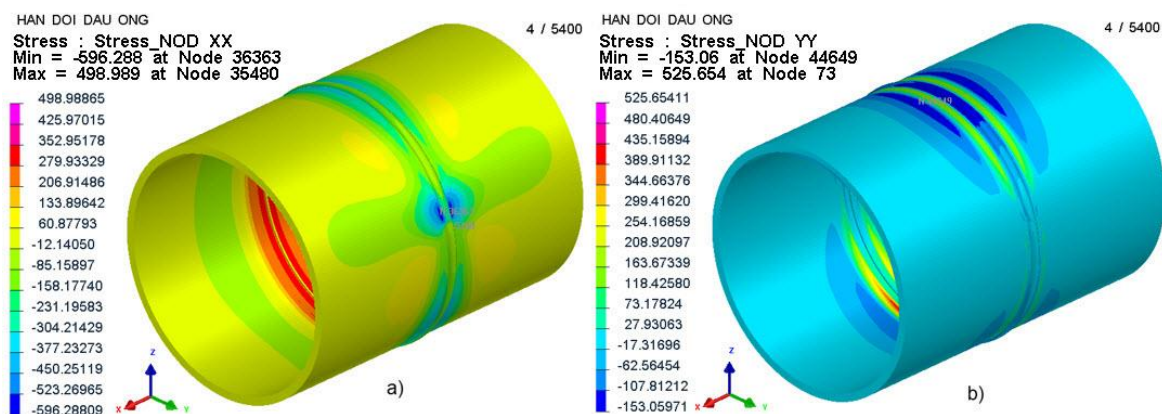
Trong các phương pháp hàn nóng chảy ứng suất dư và biến dạng là hai hiện tượng song hành. Do vậy, ứng suất trong khi hàn nói chung và ứng suất dư sau hàn nói riêng gây ảnh hưởng tiêu cực đến khả năng làm việc mà cụ thể là làm giảm khả năng chịu lực của kết cấu [6]. Hình 11 cho ta thấy sự phân bố ứng suất dư Von Mises khi hàn đối đầu hai ống thép EN 10025-2, nhận thấy rằng ứng suất tập trung cao ở điểm bắt đầu và kết thúc đường hàn. Ở khu vực dọc đường hàn và vùng AHN ứng suất dư vào 400 MPa cao hơn so với giới hạn chảy của vật liệu. Điều này hoàn toàn đúng với lý thuyết về ứng suất và biến dạng hàn, do đó sự phát triển vết nứt thường bắt đầu ở vùng AHN.



Hình 11. Ứng suất Von Mises.

3.3.2. Ứng suất pháp

Hình 12a cho ta thấy ứng suất theo phương X (phương vuông góc với đường hàn) sau thời gian mô phỏng 5400 s có giá trị là 499 MPa tại nút 35480 và ứng suất nén là -596 MPa. Dựa vào phổ màu thấy ứng suất kéo phân bố ở phía trong thành ống, ứng suất nén phân bố phía trên thành ống. Mặc dù ứng suất nén có thể giúp ngăn ngừa nứt trong một số trường hợp, nhưng sự phân bố ứng suất không đồng nhất do tạo mactenxit có thể làm tăng nguy cơ nứt nguội.



Hình 12. Ứng suất pháp: a) theo phương X, b) theo phương Y.

Trên Hình 12b mô tả ứng suất kéo theo phương Y (theo chu vi của ống) có giá trị tương đối lớn, tại nút 73 là 526 MPa; ứng suất nén có giá trị là -153 MPa. So sánh ứng suất kéo theo phương X và Y chênh

lệch nhau không đáng kể (26 MPa), tuy nhiên, ứng suất dư nén chênh lệch lớn -443 MPa. Cả hai trường hợp này ứng suất dư vượt quá giới hạn chảy của vật liệu nên khả năng xảy ra biến dạng dẻo là điều không thể tránh khỏi, do vậy cần phải áp dụng một số biện pháp làm giảm ứng suất dư như: xử lý nhiệt sau hàn, bắn bi chân mối hàn, rung khử ứng suất dư,...

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này tác giả sử dụng phần mềm SYSWELD để mô phỏng trường nhiệt độ, chuyển biến pha và ứng suất dư khi hàn thép cacbon. Nhận thấy rằng:

1. Hàm lượng bainite và mactenxit tại khu vực mối hàn là tương đối lớn dẫn đến ứng suất dư tập trung cao (theo phương Y là 526 MPa) vượt xa so với giới hạn chảy KLCB (≥ 355 MPa), tuy nhiên vẫn nhỏ hơn giới hạn bền của KLCB là 630 MPa, điều này dẫn đến xuất hiện biến dạng sau hàn làm sai lệch lắp ghép.

2. Nồng độ bainite tập trung ở đường hàn và vùng AHN chiếm tới 84%; hàm lượng bainite và mactenxit tập trung ở khu vực bắt đầu và kết thúc đường hàn lần lượt là khoảng 46,6% và 53%. Điều này có thể gây ra các vết nứt tại đây trong quá trình làm việc kéo dài nếu không sử dụng các biện pháp làm giảm ứng suất dư.

3. Ứng suất dư kéo vuông góc với đường hàn (theo phương X) tập trung phía dưới thành ống gần như hết chu vi của ống có giá trị ≈ 500 MPa, còn ứng suất dư nén tập trung phía trên bề mặt thành ống có giá trị -596 MPa.

4. Ứng suất dư kéo theo chu vi đường hàn (theo phương Y) phân bố đối xứng nhau ở một phạm vi hẹp, lớp trên thành ống chịu ứng suất nén khoảng 153 MPa, phía mặt dưới thành ống chịu ứng suất kéo 526 MPa.

Lời cảm ơn

Tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định đã tạo điều kiện cho nhóm tác giả được sử dụng phần mềm bản quyền SYSWELD trong nghiên cứu này.

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

Tuyên bố dữ liệu sẵn có

Dữ liệu hỗ trợ cho các khám phá của nghiên cứu này khi độc giả yêu cầu một cách hợp lý sẽ được tác giả liên hệ cung cấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. E. Bringas, *Handbook of Comparative World Steel Standards*, ASTM D567B, 2nd ed. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2004.
- [2] K. Weman, *Welding Processes Handbook*. Cambridge, U.K.: Woodhead Publishing, 2003.
- [3] P. V. Ravi, "Solid-state transformations in weldments," in *ASM Handbook*, vol. 6, *Materials and Applications—Welding*, pp. 70–87, 1994.
- [4] V. D. Toai, "Analysis of temperature field and phase transformation by numerical simulation during welding A516 Grade 70 structural carbon steel," *Journal of Science and Technology*, no. 100, Feb. 2022, doi: 10.52923/vmfs.jstm.22022.100.01.
- [5] Y. Cui and G. Yang, "Process optimization simulation of residual stress in martensitic steel considering phase transformation," *Crystals*, vol. 15, p. 330, 2025, doi: 10.3390/cryst15040330.
- [6] S. H. Cho and J. W. Kim, "Analysis of residual stress in carbon steel weldment incorporating phase transformations," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 7, no. 4, pp. 212–216, 2002.
- [7] D. Venkatkumar, D. Ravindran, and B. Selvakumar, "Finite element analysis of heat input effect on temperature, residual stresses and distortion in butt welded plates," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 8328–8337, 2018.
- [8] J. A. Goldak and M. Akhlaghi, *Computational Welding Mechanics*. New York, NY, USA: Springer, 2005.
- [9] H. K. D. H. Bhadeshia, "Material factors," in *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, pp. 3–10. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2002.
- [10] ESI Group, *Sysweld 2017 Reference Manual*, [CD-ROM]. Paris, France: ESI Group, 2017.
- [11] American Welding Society, *AWS D1.1/D1.1M:2020, Structural Welding Code—Steel: An American National Standard*. Miami, FL, USA: American Welding Society, 2020.
- [12] N. H. Thanh and N. T. Duong, "Determining the residual stress of K-welded pipe joint by hole drilling method," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 1012–1020, 2021, doi: 10.1007/978-981-19-1968-8.
- [13] O. G. Kasatkin, V. F. Vinokur, and V. L. Pilyushenko, "Calculation of Ac1 and Ac3 temperatures for low alloy steels," *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 26, no. 1, pp. 27–31, 1984.

- [14] D. Sebayang et al., "Numerical simulation of distortion and phase transformation in laser welding process using MSC Marc/Mentat," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/453/1/012020.
- [15] D. Radağ, *Heat Effects of Welding: Temperature Field, Residual Stress, Distortion*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1992.

Nguyễn Hồng Thanh nhận bằng tốt nghiệp kỹ sư ngành Công nghệ chế tạo máy tại Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam, năm 2004, năm 2009 nhận học vị Thạc sĩ ngành Công nghệ hàn tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Việt Nam, nhận học vị Tiến sĩ năm 2019 tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Việt Nam, giảng dạy chuyên ngành Công nghệ hàn tại Khoa cơ khí, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định từ năm 2005 đến nay. Tác giả đã công bố trên 20 bài báo đăng trên các tạp chí, kỷ yếu, hội thảo, hội nghị trong nước và quốc tế, giảng dạy các môn học: Lý thuyết hàn, công nghệ hàn, ứng suất và biến dạng hàn, quá trình luyện kim trong hàn và xử lý nhiệt hàn, lĩnh vực nghiên cứu là: ứng suất và biến dạng hàn, công nghệ hàn, mô phỏng số hàn, kỹ thuật CAE và xử lý nhiệt hàn.

Email: nhthanh@nute.edu.vn. ORCID:  <https://orcid.org/0009-0003-4855-2357>.

Mai Văn Hồng nhận học vị kỹ sư công nghệ Chế tạo máy năm 2004 tại Trường Thủy sản Nha Trang, Việt Nam, nhận học vị Thạc sĩ công nghệ chế tạo máy tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Việt Nam năm 2009 và nhận học vị Tiến sĩ ngành Công nghệ Chế tạo máy năm 2019 tại Trường Đại học Orenburg State, liên bang Nga năm 2019. Từ năm 2005, tác giả giảng dạy tại Khoa cơ khí Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định. Tác giả đã công bố trên 20 bài báo đăng trên các tạp chí, kỷ yếu, hội thảo, hội nghị trong nước và quốc tế, giảng dạy các môn học: Công nghệ chế tạo máy, dụng cụ cắt, quá trình luyện kim và kỹ thuật vật liệu. Lĩnh vực nghiên cứu của tác giả là: tự động hóa quá trình cắt gọt, máy chính xác, tuổi bền và độ mài mòn của dụng cụ cắt và công nghệ xử lý nhiệt.

Email: mvhong@nute.edu.vn. ORCID:  <https://orcid.org/0009-0001-1933-9296>.