

ỨNG SUẤT - BIẾN DẠNG VÀ SỰ THAY ĐỔI TỔ CHỨC TẾ VI DƯỚI TÁC DỤNG CỦA NGỌN LỬA OXY-ACETYLENE

STRESS - STRAIN AND MICROSTRUCTURAL EVOLUTION UNDER THE OXY-ACETYLENE TORCH

LÊ THỊ NHUNG

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: nhunglt.vck@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Nghiên cứu sử dụng phần mềm Ansys để mô phỏng trường nhiệt độ trên các tấm làm bằng thép cacbon, qua đó tính toán sự hình thành ứng suất và biến dạng trên toàn bộ bề mặt tấm. Kích thước của tấm là 1000x1000x10mm, nguồn nhiệt được sử dụng là oxy-acetylene với nhiệt độ gia nhiệt vào khoảng 600°C di chuyển với tốc độ 5mm/s trên bề mặt tấm. Kết quả mô phỏng đã đưa ra vị trí chịu ứng suất kéo nén trên bề mặt, từ đó dự đoán được xu hướng biến dạng của vật liệu. Bên cạnh đó nghiên cứu cũng đưa ra sự thay đổi tổ chức tế vi và độ cứng của vật liệu trước và sau khi gia nhiệt. Kết quả thu được cho thấy, mặc dù có sự thay đổi về kích thước hạt giữa các vùng khác nhau nhưng tính chất và độ cứng của vật liệu không có sự thay đổi nhiều so với tấm ban đầu.

Từ khóa: Tạo hình bằng nhiệt, nguồn nhiệt, biến dạng, ứng suất, tổ chức tế vi.

Abstract

Ansys software was used to simulate the temperature field on carbon steel plates, stress - strain formation on the entire plate surface. The size of sample was 1000x1000x10mm, the heat source was oxy-acetylene with a heating temperature of about 600°C, and moving at a speed of 5mm/s on the plate surface. The simulation results show the positions of tensile and compressive stress on the surface, thereby predicting the deformation trend of the material. In addition, the microstructural evolution and hardness of the material before and after heating were studied. Although there was a change in grain size between different areas, the properties and hardness of the material change slightly compared to the original plate.

Keywords: Thermoforming, heat source, strain, stress, microstructure.

1. Mở đầu

Tạo hình bằng nguồn nhiệt chuyển động là một phương pháp hiệu quả và tiết kiệm giúp tạo hình ba chiều cho các tấm kim loại, thường áp dụng cho các tấm thân vỏ tàu, tàu hỏa, máy bay hoặc tạo nhanh các vật thể có đường cong phức tạp. Kỹ thuật tạo hình được thực hiện bằng cách cung cấp nguồn nhiệt và làm mát có kiểm soát dọc theo các đường được xác định trước trên bề mặt tấm. Khi tấm kim loại được gia nhiệt ở một mặt tới nhiệt độ tối hạn sẽ làm cho vật liệu mềm ra (giới hạn chảy thấp hơn), sự chênh lệch nhiệt độ tại các điểm dẫn tới tấm bị giãn nở nhiệt khác nhau và bị uốn cong. Khi kết hợp với sự mất nhiệt và nguồn nhiệt di chuyển phân tán, do ứng suất nén làm cho vùng bị gia nhiệt co lại và tấm bị uốn cong theo chiều ngược lại. Hai loại nguồn nhiệt thường được sử dụng trong quy trình gia nhiệt là mô oxy-acetylene và cuộn cảm ứng. So với phương pháp gia nhiệt bằng cuộn cảm ứng đòi hỏi quy trình chuẩn bị và thiết bị phức tạp, gia nhiệt bằng mô oxy-acetylene được sử dụng rộng rãi hơn do tính linh hoạt và tiết kiệm chi phí. Tuy nhiên, phương pháp này gặp phải khó khăn trong việc kiểm soát nguồn nhiệt nên cần nhiều kinh nghiệm của người công nhân. Do đó, các phương pháp nghiên cứu liên quan thường tập trung tìm hiểu về cơ chế, điều kiện gia nhiệt kết hợp với tính chất cơ học của vật liệu để dự đoán chiều biến dạng.

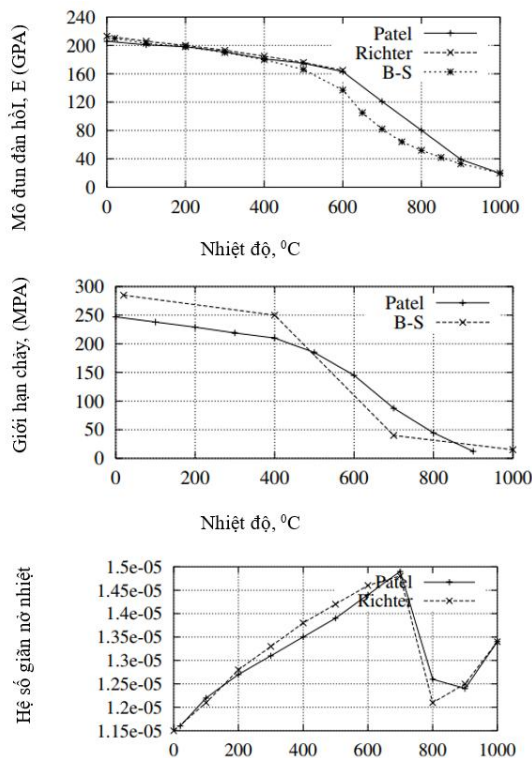
Quá trình tạo hình tấm kim loại bằng gia nhiệt là một quy trình cơ học kết hợp, phi tuyến tính và thường được mô phỏng theo thời gian bằng mô hình ba chiều. Ban đầu, Moshaiov [1, 2] là những người đi đầu trong việc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn biên để phân tích quá trình uốn tấm, tuy nhiên kết quả nhận được không tương đồng với các thí nghiệm thực nghiệm. Kyrzanidi và cộng sự [3] đã thực hiện mô phỏng FEM của quá trình tạo hình bằng laser. Nhược điểm của các mô hình ba chiều này là thời gian tính toán cần thiết thường rất dài, từ vài giờ đến vài ngày và không phù hợp để phân tích thời gian thực. Tiếp tục cùng với sự phát triển, Moshaiov và cộng sự [4] đề xuất mô hình đơn giản hơn để phân tích quá trình truyền nhiệt trên tấm

nhưng cần thực hiện nhiều công việc hơn để xác định tải trọng và góc uốn. Nghiên cứu của Jang [5] cũng sử dụng phân tích đàn hồi-biến dạng dẻo đơn giản biểu diễn tương tác giữa các vùng biến dạng trung tâm và vùng đàn hồi xung quanh, tuy nhiên vùng biến dạng dẻo được xác định bằng công thức thực nghiệm.

Một trong các vấn đề cần quan tâm khi tiến hành gia nhiệt là ảnh hưởng của nguồn nhiệt tới đặc tính của vật liệu. Thông thường, khi nhiệt độ thay đổi, ngoài việc hình thành ứng suất dư do chênh lệch nhiệt còn làm cho cấu trúc, tổ chức và tính chất của vật liệu thay đổi. Có rất ít nghiên cứu về sự thay đổi của vật liệu dưới tác động của nguồn nhiệt trong quá trình tạo hình. Nghiên cứu [6, 7] có đưa ra ảnh hưởng của nguồn nhiệt khi sử dụng nguồn cảm ứng từ tới sự hình thành vùng ảnh hưởng nhiệt trong vật liệu nhưng chưa đề cập tới sự hình thành.

Mục tiêu của bài báo là nghiên cứu mô hình nhiệt cơ học trong tính toán dự đoán khả năng biến dạng dẻo của tấm và mô phỏng ứng suất - biến dạng thông qua phần mềm Ansys. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng tiến hành đánh giá sự thay đổi tổ chức của các vùng lân cận và sự thay đổi cơ tính của vật liệu.

2. Cơ sở lý thuyết



Hình 1. Tính chất vật liệu [8]

Thông số đầu vào cho quá trình mô phỏng trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng bao gồm đặc tính của

vật liệu, loại nguồn nhiệt và điều kiện biên. Dữ liệu về tính chất của vật liệu thường được sử dụng từ các nguồn cơ bản là của Patel [8], Richter và Birk-Sorensen [9]. Trong nghiên cứu này sử dụng cơ sở dữ liệu Patel cho thép cacbon được biểu diễn trên Hình 1.

Nguồn nhiệt là một trong các yếu tố quan trọng quyết định tới kết quả của quá trình nghiên cứu, vì đây được coi là động lực của phương pháp tạo hình. Đối với nguồn nhiệt là ngọn lửa khí $C_2H_2+O_2$, thông lượng nhiệt phân bố theo tiêu chuẩn Gauss. Phân phối nhiệt theo chuẩn Gauss được thể hiện như sau:

$$Q''(r) = Q''_{max} e^{-\gamma r^2} \quad (1)$$

Trong đó: Q'' là nhiệt lượng tại vị trí đang xét, Q''_{max} là giá trị cao nhất, γ là hệ số chiều rộng, r là khoảng cách từ vị trí đang xét tới tâm. Tổng lượng nhiệt đầu vào, $Q_{tổng}$, là tích phân của phân phối:

$$Q_{tổng} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty Q'' r dr d\theta = \frac{\pi Q''_{max}}{\gamma} \quad (2)$$

Gọi r là bán kính ngọn lửa khí được xác định khi Q'' bằng 1% Q''_{max} . Khi đó:

$$Q''_{max} e^{-\gamma r^2} = 0.01 Q''_{max} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\ln 100}{r^2} \quad (4)$$

Có ba cơ chế truyền nhiệt trên bề mặt của tấm là dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ nhiệt. Trong đó, sự dẫn nhiệt tuân thủ định luật thứ nhất của nhiệt động lực học (bỏ qua sự truyền nhiệt do vận chuyển khối lượng và sinh nhiệt) được thể hiện trong công thức:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{q} = 0 \quad (5)$$

Trong đó: ρ là mật độ, c_p là nhiệt dung riêng, T là nhiệt độ, t là thời gian, ∇ là toán tử phân kỳ và $\bar{q}$ là vector thông lượng nhiệt, x nằm dọc theo đường truyền nhiệt, y vuông góc với đường truyền nhiệt và z theo hướng độ dày.

Thông lượng nhiệt và độ dốc nhiệt độ có mối quan hệ với nhau theo định luật Fourier:

$$\bar{q} = -D \nabla T \quad (6)$$

Trong đó: D là độ dẫn điện, ∇ là toán tử gradient.

Sự truyền nhiệt do đối lưu từ bề mặt tấm được mô tả theo tiên đề Newton như sau:

$$Q_c = \int_A h_f (T_s - T_B) dA \quad (7)$$

Trong đó: h_f là hệ số màng có thể thay đổi theo nhiệt độ, T_s là nhiệt độ bề mặt và T_B là nhiệt độ không khí khối.

Nhiệt bức xạ từ tấm được mô hình hóa theo định luật Stefan-Boltzmann về bức xạ:

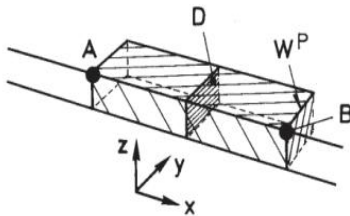
$$Q_R = \int_A \epsilon \sigma (T_s^4 - T_B^4) dA \quad (8)$$

Trong đó A là diện tích, ϵ là độ phát xạ bức xạ và σ là hằng số Stefan-Boltzmann.

Biến dạng và hình dạng cuối cùng của tấm chịu sự kiểm soát của các yếu tố gồm kích thước tấm, vị trí đường gia nhiệt, tốc độ di chuyển của nguồn nhiệt, chiều dày tấm và đặc tính của vật liệu. Để mô tả biến dạng cục bộ của tấm, vùng mô phỏng (D) được giả định là khu vực lân cận vùng chịu ảnh hưởng nhiệt trong trường biến dạng dẻo, vuông góc với điểm trung tâm của đường dẫn nhiệt ($x=0$). Do đó, phân phối biến dạng được coi là tuyến tính theo chiều dày z . Khi đó, phân phối biến dạng trung bình là tích phân trên chiều rộng của vùng biến dạng dẻo theo chiều z như sau:

$$\hat{\epsilon}_{x,y}^p(z) = \frac{1}{w^p} \int_0^{w^p} \epsilon_{x,y}^p(y,z) dy \quad (9)$$

Độ uốn cong và độ co ngót thu được bằng phương pháp bình phương nhỏ nhất kết quả phân bố biến dạng trung bình thu được từ phương trình trên.

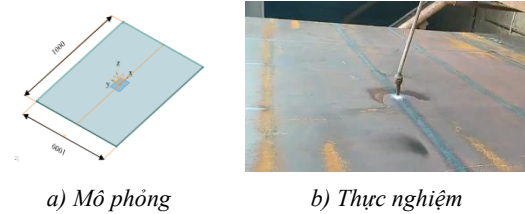


Hình 2. Định nghĩa về vùng mô phỏng [1]

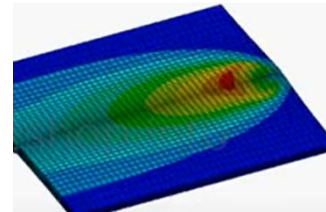
3. Kết quả mô phỏng

Vật liệu được sử dụng trong nghiên cứu là thép cacbon thường có chiều dày là 1000x1000x10mm. Thành phần hóa học của mẫu có 0,2%C và tính chất của vật liệu được thể hiện trong Hình 1. Nguồn nhiệt được di chuyển tại tâm của tấm dọc theo trục x . Để tránh sự hình thành Mactenxit tại vùng ảnh hưởng nhiệt và tránh sự thay đổi hệ số giãn nở nhiệt, giới hạn chảy và mô đun đàn hồi khi gia nhiệt hay làm nguội ở gần nhiệt độ chuyển biến pha, nên nhiệt độ gia nhiệt cho thép cacbon thường nhỏ hơn 727°C. Nghiên cứu đã sử dụng phần mềm Ansys phiên bản 2019 để mô phỏng trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng dẻo trên tấm khi tiến hành gia nhiệt ở nhiệt độ 600°C với tốc độ di chuyển nguồn nhiệt là 5mm/s. Các mẫu sau khi gia nhiệt xong sẽ được cắt nhỏ để quan sát sự thay đổi tổ chức trên kính hiển vi điện tử quang học Leica 4000/Axiovert 25 A và đo độ cứng tại vùng ảnh hưởng nhiệt bằng máy ARK600, đặt tải 100g, thời gian 10 giây.

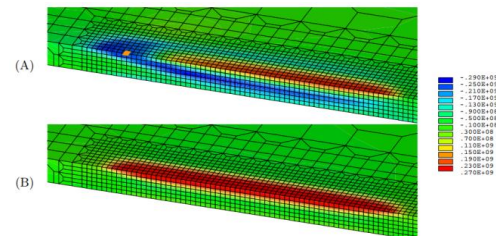
Như phân tích ở trên, trường nhiệt độ phân bố trên tấm tuân theo định luật Gauss. Nhiệt độ cao nhất đạt được là 600°C, sau đó giảm dần ra xung quanh. Đường biểu diễn nhiệt độ tại các vị trí khác nhau được mô tả trong Hình 4.



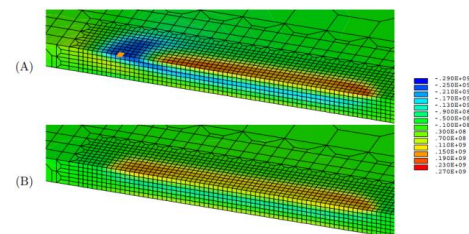
Hình 3. Kích thước mẫu và hướng di chuyển của nguồn nhiệt



Hình 4. Đường biểu diễn nhiệt độ tại các vị trí trong vùng ảnh hưởng nhiệt



Hình 5. Ứng suất theo phương x . (A) Giai đoạn trung gian, (B) Giai đoạn cuối cùng

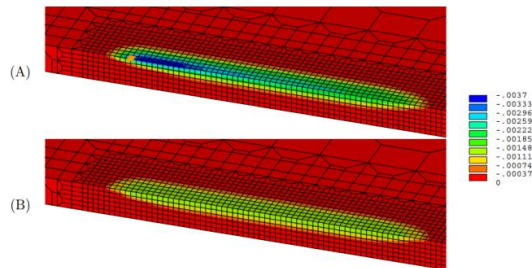


Hình 6. Ứng suất theo phương y . (A) Giai đoạn trung gian, (B) Giai đoạn cuối cùng

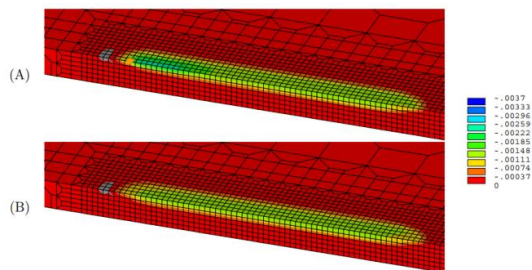
Thành phần ứng suất theo các trục x , y được đưa ra trong Hình 5, 6. Biến dạng dẻo được đưa ra trong Hình 7, 8.

Dựa theo kết quả thu được trên Hình 4 cho thấy, nhiệt độ không lan truyền quá xa ra khu vực xung quanh, đường biểu diễn nhiệt độ 600°C cách vị trí trung tâm khoảng 4cm. Hình 5, 6 cho thấy, khu vực ngay dưới nguồn nhiệt phát ra từ mỏ đốt chịu ứng suất nén lớn nhất (theo cả hai trục x , y). Đối với ứng suất theo trục x , σ_x , một diện tích lớn ở phía trước mỏ đốt bị nén và giảm dần về 0 khi càng xa mỏ đốt. Đối với ứng suất theo trục y , σ_y , phần diện tích ở phía trước và phía dưới mỏ đốt bị nén, nhưng do tính đối xứng theo hướng y nên có thêm một diện tích có ứng

suất kéo cố định ở mặt dưới của tấm. Sau khi làm nguội, σ_x chủ yếu là chịu kéo, trong khi σ_y chịu kéo trên bề mặt và chịu nén ở tâm. Bên cạnh đó, ứng suất kéo theo hướng x cũng lớn hơn theo hướng y .



Hình 7. Biểu dạng dẻo theo phương x. (A) Giai đoạn trung gian, (B) Giai đoạn cuối cùng



Hình 8. Biểu dạng dẻo theo phương y. (A) Giai đoạn trung gian, (B) Giai đoạn cuối cùng

Hình 7, 8 biểu diễn giá trị biến dạng dẻo cho thấy, trạng thái cuối cùng hoàn toàn là biến dạng nén, ngoại trừ ngay phía trước mô đốt. Khi nguồn nhiệt đi qua, vật liệu nguội đi và các biến dạng dẻo không đổi trong một thời gian, trong khi sự co lại của thép làm thay đổi trạng thái ứng suất từ nén sang kéo. Điều này làm cho tấm bị uốn cong theo chiều ngược lại. Trong phần thực nghiệm sẽ không tiến hành đo giá trị ứng suất của tấm, mà chỉ so sánh kết quả biến dạng giữa mô phỏng và thực tế. Mức độ biến dạng của tấm cho thấy, kết quả mô phỏng hoàn toàn phù hợp với thực nghiệm, vùng dưới nguồn nhiệt bị biến dạng nhiều nhất đạt khoảng 10mm, sau đó giảm dần ra hai bên.

4. Ảnh hưởng nhiệt độ tới tổ chức và cơ tính của vật liệu

Dưới tác động của nguồn nhiệt, ngoài sự thay đổi ứng suất và biến dạng bên trong tấm còn làm cho tổ chức và cơ tính của vật liệu bị thay đổi. Dọc theo hướng di chuyển theo trục x của mô đốt, nhiệt độ sẽ lan truyền sang hai bên (chiều y) và theo chiều dày (chiều z). Theo mô phỏng trong Hình 4, chiều rộng vùng ảnh hưởng nhiệt đạt khoảng 4cm. Trước khi gia nhiệt, tổ chức tế vi của vật liệu gồm hai pha Ferit và Peclit với kích thước hạt nhỏ mịn và đồng đều nhau trên toàn bộ bề mặt (Hình 9). Sau khi gia nhiệt, sự

thay đổi tổ chức tế vi của vật liệu tại các vị trí cách nguồn nhiệt 1cm, 2cm, 3cm và 4cm được đưa ra trong Hình 10 và Hình 11.



Hình 9. Tổ chức tế vi của thép trước khi gia nhiệt



a) $y = 3\text{cm}$



b) $y = 2\text{cm}$



c) $y = 0\text{cm}$

Hình 10. Tổ chức tế vi của thép theo chiều y sau khi gia nhiệt

So sánh hình ảnh tổ chức tế vi của thép tại các vị trí khác nhau trong vùng ảnh hưởng nhiệt với tổ chức của thép ban đầu thì không có sự thay đổi về pha, tuy nhiên, kích thước của hạt tại vùng gần nguồn nhiệt lớn hơn và giảm dần về vùng kim loại cơ bản. Vị trí $y = 0\text{cm}$ có hình thành một lượng nhỏ pha Mactenxit (có dạng hình kim) nên làm tăng nhẹ độ cứng của vật liệu. Độ cứng ban đầu của tấm trung bình là

148,5HV. Dựa theo kết quả trên Bảng 1 có thể kết luận khi gia nhiệt ở nhiệt độ 600°C không làm thay đổi nhiều về cơ tính của vật liệu.



a) $z = 3\text{ cm}$



b) $z = 2\text{ cm}$



c) $z = 1\text{ cm}$

Hình 11. Tổ chức tế vi của thép theo chiều z sau khi gia nhiệt

Bảng 1. Kết quả độ cứng theo trục y và z

Độ cứng theo trục y (HV)

A	B	C	D
152	150	150	149

Độ cứng theo trục z (HV)

E	F	G	H
154	149	150	148



5. Kết luận

Nghiên cứu đã mô phỏng được trường nhiệt độ và sự hình thành ứng suất biến dạng của tấm dựa trên phần mềm Ansys 2019, qua đó đánh giá sơ bộ hướng biến dạng khi chịu tác động của nguồn nhiệt. Bên

cạnh đó, các kết quả phân tích về tổ chức tế vi cho thấy, khi nung ở nhiệt độ 600°C, tổ chức của vật liệu không có sự thay đổi (pha Ferrit và Peclit), tuy nhiên sẽ làm thay đổi kích thước hạt do sự lớn lên của hạt. Sự tăng độ cứng tại vùng nguồn nhiệt là do sự hình thành một lượng nhỏ các pha cứng nhưng sự thay đổi này là không đáng kể và không ảnh hưởng tới độ bền của vật liệu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.19**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Moshaiiov, A., & Latorre, R. (1985). *Temperature distribution during plate bending by torch flame heating*. Journal of Ship Research, Vol.29(01), pp.1-11.
- [2] Moshaiiov, A., & Vorus, W. S. (1987). *The mechanics of the flame bending process: theory and applications*. Journal of Ship Research, Vol.31(04), pp.269-281.
- [3] Kyrsanidi, A. K., Kermanidis, T. B., & Pantelakis, S. G. (1999). *Numerical and experimental investigation of the laser forming process*. Journal of Materials Processing Technology, Vol.87(1-3), pp.281-290.
- [4] Epure, V., Hamciuc, V., Pricop, L., Pinteala, M., Airinei, A., Harabagiu, V., ... & Perichaud, A. (2007). *Piperazinyl-modified polysiloxanes and their Cu (II) complexes*. High Performance Polymers, Vol.19(3), pp.270-282.
- [5] Jang, C. D., Seo, S. I., & Ko, D. E. (1997). *A Study on the Prediction of Deformations of Plates due to Line Heating Using a Simplified Thermal Elasto-Plastic Analysis Method*. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.34(3), pp.104-112.
- [6] Lee, K. S., Kim, S. W., & Eom, D. H. (2011). *Temperature distribution and bending behaviour of thick metal plate by high frequency induction heating*. Materials Research Innovations, Vol.15(sup1), pp.s283-s287.
- [7] Zhang, S., Liu, C., Wang, X., & Yang, Z. (2018). *Effects of inductor patterns on temperature and deformation behavior of ship hull plate by induction heating*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.232(23), pp.4371-4389.

- [8] Patel, B. G. (1985). *Thermo-elasto-plastic finite element formulation for deformation and residual stresses due to welds*, (Doctoral dissertation, Carleton University).
- [9] Birk-Sørensen, M., & Jensen, J. J. (1999). *Simulation of welding distortions in ship section*. Technical university of Denmark.

Ngày nhận bài:	09/02/2025
Ngày nhận bản sửa:	10/03/2025
Ngày duyệt đăng:	12/03/2025