



## ANALYSIS ON RESIDUAL STRESSES OF WELDED I-SECTION STEEL BEAM

Pham Van Phe<sup>1</sup>, Nguyen Xuan Huy<sup>1\*</sup>, Doan Tan Thi<sup>2</sup>, Nguyen Ngoc Hoan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Faculty of Civil Engineering, Campus in Ho Chi Minh City, University of Transport and Communications, No. 450- 451 Le Van Viet Street, Thu Duc city, Ho Chi Minh City, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 26/02/2024

Revised: 25/05/2024

Accepted: 11/06/2024

Published online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.17>

\* *Corresponding author*

Email: [nguyexuanhuy@utc.edu.vn](mailto:nguyexuanhuy@utc.edu.vn)

**Abstract.** The residual stresses distribution is an important factor in the behaviour of welded steel structures. The present paper conducts numerical research on the effect of temperatures on the residual stresses in welded I-section steel beams. A finite element analysis conducted in ABAQUS is proposed for the modelling of the stresses and deformations of heat weld joints. The model is developed by using three-dimensional finite elements to capture the stress distributions across the member thicknesses. The elements consider the effect of temperature changes of welding processes. The results of the modeling are then compared with a Eurocode specification-based model and experiment-based study. Such comparisons show the reliability and accuracy of the present numerical model for the prediction of weld residual stresses. Based on this model, the effect of temperatures on the formation, development and existence of residual stresses in the welded structures during and after the welding process is analyzed in detail.

**Keywords:** Steel beams, residual stresses, heat welds, temperatures, welding process

@ 2024 University of Transport and Communications



## PHÂN TÍCH ỨNG SUẤT DƯ TRONG DÀM THÉP TỔ HỢP HÀN MẶT CẮT CHỮ I

Phạm Văn Phê<sup>1</sup>, Nguyễn Xuân Huy<sup>1\*</sup>, Đoàn Tấn Thi<sup>2</sup>, Nguyễn Ngọc Hoàn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Giao thông Vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 450-451 Lê Văn Việt, thành phố Thủ Đức, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 26/02/2024

Ngày nhận bài sửa: 25/05/2024

Ngày chấp nhận đăng: 11/06/2024

Ngày xuất bản Online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.17>

\* Tác giả liên hệ

Email: nguyensexuanhuy@utc.edu.vn

**Tóm tắt.** Sự phân bố của ứng suất dư là một yếu tố rất quan trọng tác động tới sự làm việc của kết cấu thép hàn tổ hợp. Bài báo tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của sự phân bố nhiệt độ trong dầm thép tổ hợp hàn nhiệt mặt cắt hình chữ I tới ứng suất dư. Một mô hình phần tử hữu hạn dựa trên phần mềm ABAQUS được thiết lập nhằm mô phỏng quá trình phát sinh ứng suất và biến dạng của các mối hàn nhiệt. Mô hình này dựa trên các phần tử ba chiều để có thể xem xét sự phân bố ứng suất theo chiều dày cấu kiện. Các phần tử này có tính đến sự thay đổi nhiệt độ của các quá trình hàn. Kết quả của mô hình sau đó được so sánh với một số tiêu chuẩn thiết kế và nghiên cứu khác cho thấy độ tin cậy và chính xác cao của mô hình đã xây dựng. Dựa trên mô hình này, ảnh hưởng của nhiệt độ tới sự hình thành, phát triển và tồn tại của ứng suất dư trong toàn bộ quá trình hàn được khảo sát và phân tích chi tiết.

**Từ khóa:** Dầm thép, ứng suất dư, hàn nhiệt, nhiệt độ, quá trình hàn

@2024 Trường Đại học Giao thông Vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu thép được sử dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng dân dụng, công nghiệp cũng như giao thông. Trong các giải pháp liên kết của kết cấu thép, phương pháp liên kết hàn nhiệt là phổ biến nhất. Sử dụng mối hàn nhiệt làm xuất hiện biến dạng/ ứng suất nhiệt (ứng suất dư) do sự co ngót không đều giữa kim loại của vật hàn và kim loại cơ bản trong quá trình nung nóng và làm nguội trong khi hàn và sau khi hàn. Biến dạng hàn có thể gây phát sinh chi phí sửa chữa, giảm chất lượng, thẩm mỹ của sản phẩm và tăng thời gian thi công. Đối

với vùng chịu ứng suất dư kéo lớn, vết nứt đường hàn có nguy cơ xuất hiện lớn hơn khi kết cấu chịu tải trọng khai thác (Khi biến dạng tổng do quá trình hàn và tải trọng khai thác lớn hơn biến dạng kéo đứt của thép). Nhiều ví dụ về sự cố đã xảy ra trong ở ngoài nước như nứt dầm gàn mối hàn trong dầm cầu Vàm Cống [1], phá hoại thảm khốc của hệ kết cấu được liên kết hàn của hệ giàn khoan Alexander L. Kielland ở Na-uy [2]. Các vết nứt đường hàn làm tăng tốc phá hoại mỏi của kết cấu [3, 4]. Vì vậy việc nghiên cứu sự phân bố và độ lớn của các ứng suất dư quanh mối hàn, để từ đó đánh giá được chính xác tình trạng kết cấu do hàn gây ra là vấn đề quan trọng và cần được quan tâm cấp thiết [5, 6].

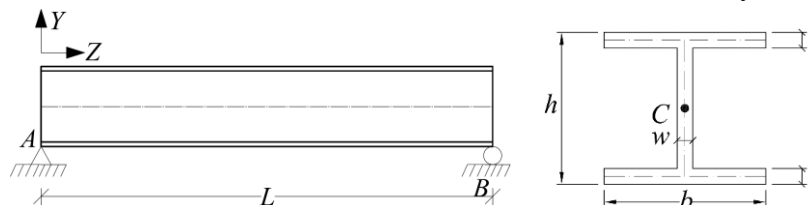
Một số nghiên cứu về ứng suất dư trong liên kết hàn cho các kết cấu khác nhau đã được thực hiện. N.H. Thanh [7] đã đánh giá trạng thái ứng suất dư trong liên kết hàn nút giàn dạng ống. N.H. Thanh và cộng sự [4] trình bày một nghiên cứu về sự phân bố ứng suất dư và biến dạng khi hàn ống thép không gỉ 316L bằng phần mềm Sysweld. H.T. Ánh và cộng sự [3] phân tích ứng suất dư và biến dạng khi hàn giáp mối hai tấm thép không gỉ AISI 304. Các nghiên cứu thực nghiệm và phân tích số của Kubo và cộng sự [8], Kabir và Bhowmick [9] làm rõ sự phân bố ứng suất quanh mối hàn. Schaper và cộng sự [10] đề xuất một mô hình đơn giản thể hiện sự phân bố ứng suất dư do hàn nhiệt. Một số mô hình giải tích cũng biểu diễn ứng suất dư cũng được đề xuất trong của tiêu chuẩn Châu Âu ECCS [11, 12]. Các kết quả đều cho thấy sự tồn tại của ứng suất dư sẽ ảnh hưởng tới khả năng chịu lực của kết cấu. Tuy nhiên quá trình tăng nhiệt và nguội dần đi giữa các vị trí khá phức tạp dẫn đến ứng suất dư tại các điểm khác nhau trong mối hàn sẽ có giá trị khác nhau. Các nghiên cứu lý thuyết, thực nghiệm, phân tích số đã thực hiện cũng chỉ có thể đề cập tới một số trường hợp cụ thể, dựa trên những giả thiết đơn giản.

Bài báo này hướng tới một cách tiếp cận khác trong việc phân tích ứng suất dư- cụ thể đối với trường hợp dầm thép tổ hợp hàn nhiệt mặt cắt hình chữ I. Một mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) dựa trên phần mềm ABAQUS được xây dựng để mô phỏng quá trình phát sinh ứng suất và biến dạng của mối hàn nhiệt. Thông qua mô hình này, ảnh hưởng của nhiệt độ mối hàn tới sự hình thành ứng suất dư trong mối hàn nhiệt được phân tích và đánh giá.

## 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH BIỂU DIỄN PHÂN BỐ ỨNG SUẤT DƯ DO MỐI HÀN NHIỆT

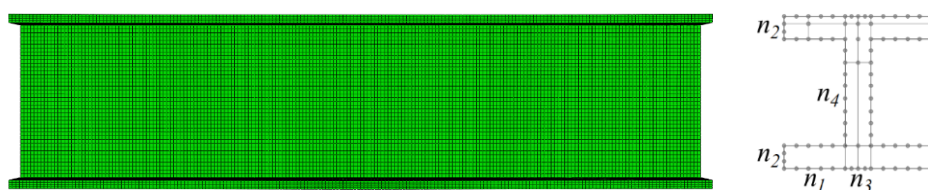
### 2.1. Thiết lập mô hình

Mục tiêu của phần này là thiết lập được một mô hình số nhằm làm rõ hơn về sự hình thành, phát triển và sự tồn tại cuối cùng của ứng suất dư trong mối hàn nhiệt. Ảnh hưởng của chất lượng đường hàn bị rỗ, khí, xỉ không nằm trong phạm vi nghiên cứu của bài báo. Mô hình PTHH được xây dựng dựa trên phần mềm Abaqus với sự phong phú của các dạng phần tử (một chiều, hai chiều, ba chiều) cho phép người dùng tạo ra các mối hàn với đường hàn phẳng, lõm hoặc lồi như thực tế. Một ví dụ dầm thép giản đơn có mặt cắt ngang chữ I được lựa chọn để minh họa cho việc thiết lập mô hình. Cụ thể, dầm thép có các kích thước cơ bản là:  $h = 266\text{mm}$ ,  $t = 13\text{mm}$ ,  $b = 148\text{mm}$ , và  $w = 7,6\text{mm}$ . Chiều dài dầm lấy là 2,0m.



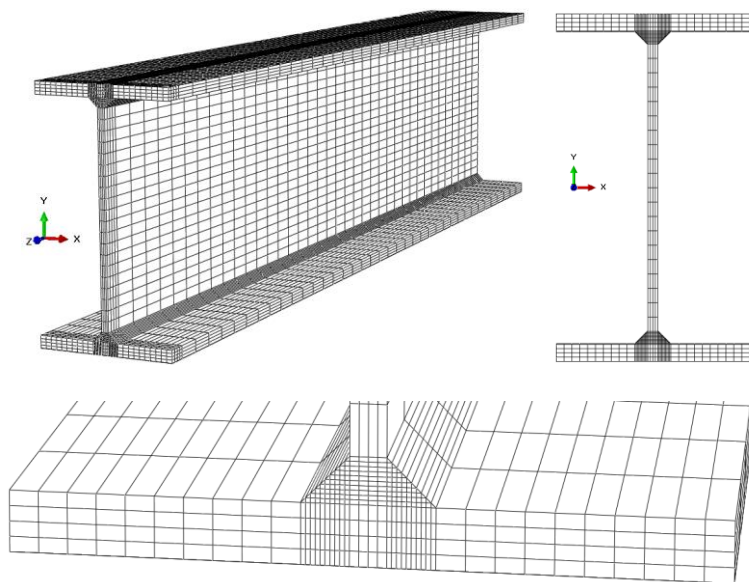
Hình 1. Sơ đồ của dầm thép nghiên cứu.

Phần tử khối ba chiều C3D8RT có 8 nút, mỗi nút có 3 chuyển vị đường theo 3 phương độc lập được lựa chọn cho mô hình. Với mỗi phần tử có tổng cộng 24 bậc tự do và có một điểm tích phân ở trọng tâm của phần tử. Lưới PTHH được tạo bởi các phần tử khối C3D8R thông qua 5 số lượng phần tử độc lập  $n_1$  tới  $n_5$  (Hình 2) trong đó  $n_1$  là số lượng phần tử chia đều trên phần hẫng của bản cánh,  $n_2$  là số lượng phần tử chia đều trên chiều dày của bản cánh,  $n_3$  là số lượng phần tử chia đều theo chiều dày của bản bụng,  $n_4$  là số phần tử chia đều theo chiều cao bản bụng, và  $n_5$  là số phần tử chia đều dọc theo chiều dài dầm. Một nghiên cứu độ nhạy cảm của lưới phần tử tới sự hội tụ của ứng suất dư được thực hiện, tương như đã được thực hiện trong nghiên cứu trước đây của nhóm tác giả [13]. Một lưới hợp lý cho kết quả hội tụ được tìm thấy, trong đó số các phần tử dọc theo các kích thước của kết cấu là  $n_1 = 20$ ,  $n_2 = n_3 = 4$ ,  $n_4 = 40$  và  $n_5 = 400$  phần tử.



Hình 2. Các thông số độc lập của lưới phần tử.

Việc tích hợp mối nối hàn vào mô hình được thực hiện bằng cách sử dụng các phần tử hình lăng trụ với đáy là tam giác, có tên là C3D6T. Ký hiệu T trong phần tử thể hiện cho việc phần tử này có thể làm việc trong bài toán nhiệt (hình 3).

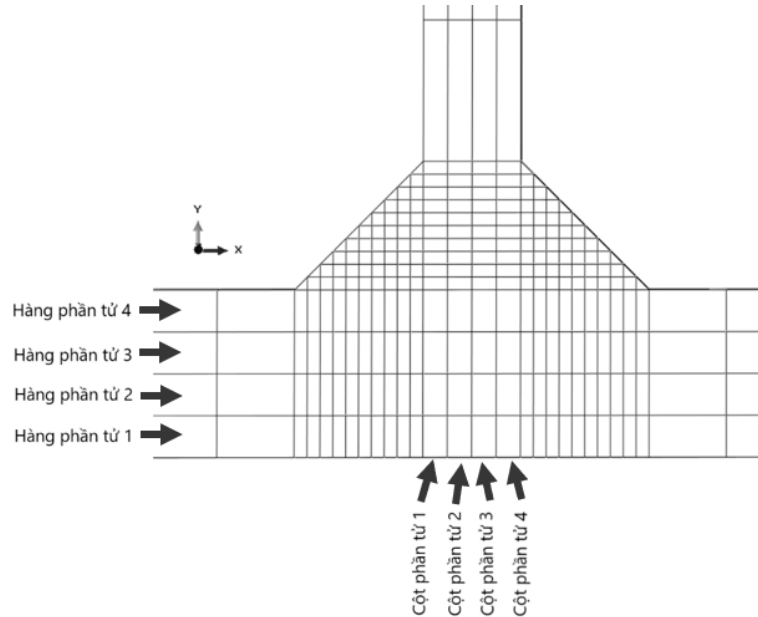


Hình 3. Lưới phần tử mối hàn trong mô hình.

Để xác định được ứng suất dư trong mô hình, các nhóm phần tử được định nghĩa ban đầu. Đối với bản cánh, chiều dày của bản được rời rạc bằng 4 phần tử và chia thành 4 hàng phần tử tính từ trái sang. Đối với bản bụng, chiều dày của bản cũng được chia thành 4 cột phần tử, do đó cũng chia thành 4 cột phần tử tính từ dưới đáy dầm lên đến đỉnh dầm (Hình 4).

Quan hệ ứng suất- biến dạng của thép kết cấu trong điều kiện nhiệt thường được chia thành một giai đoạn đàn hồi tuyến tính và một giai đoạn phi tuyến. Theo nghiên cứu [14], dưới ảnh hưởng của nhiệt độ tăng hoặc giảm dần, mối quan hệ này có sự thay đổi. Ở nhiệt độ

0<sup>0</sup>C, mô đun đàn hồi của thép E = 200000 MPa. Khi nhiệt độ tăng tới 600<sup>0</sup>C, mô đun đàn hồi của thép là E = 110000 MPa. Khi nhiệt độ tăng tới 1470<sup>0</sup>C, mô đun đàn hồi của thép chỉ còn là E = 10000 MPa. Tương tự, hệ số giãn nở nhiệt (expansion), hệ số truyền nhiệt (conductivity), khối lượng riêng (density) và nhiệt dung riêng (specific heat) của vật liệu thép phụ thuộc vào nhiệt độ cũng được nhập vào mô hình (Hình 5).



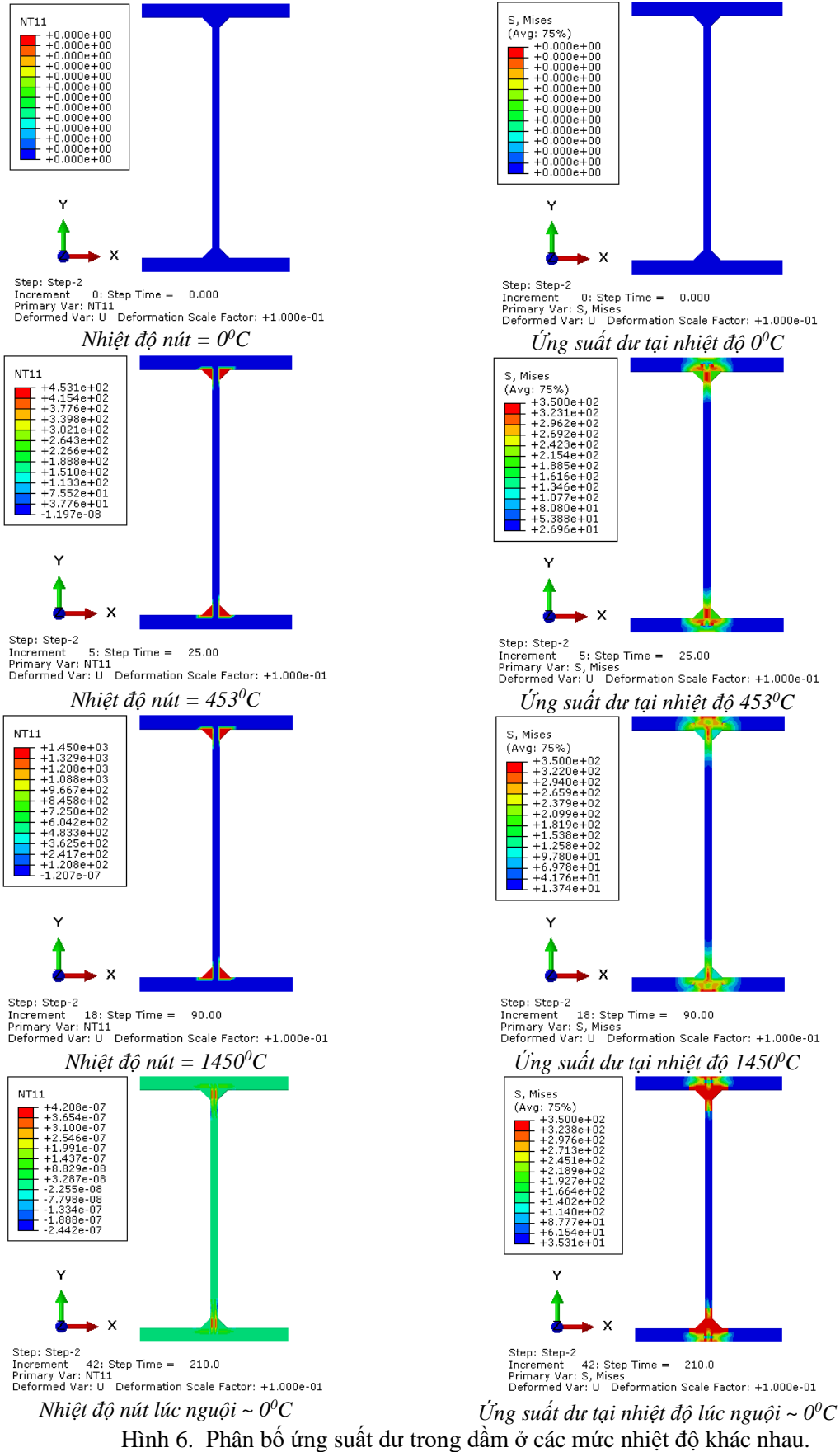
Hình 4. Định nghĩa các nhóm hàng, cột phần tử.

*SOLID SECTION, ELSET=WideFlangeBeam, MATERIAL=STEEL	*Conductivity
*MATERIAL, NAME=STEEL	47.574, 10
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC	48.037, 114
210000, 0.3, 0	41.854, 315
110000, 0.3, 600	35.641, 513
10000, 0.4, 1470	29.921, 714
*Plastic	26.864, 1040
*INCLUDE, INPUT=steel1.csv	29.527, 1240
*Expansion	*Density
1.33E-05, 10	7850., 10
1.57E-05, 600	*Specific Heat
1.74E-05, 1470	459961000, 40
	589152000, 315
	631558000, 413
	669034000, 514
	670020000, 614
	669034000, 715
	685799000, 1039

Hình 5. Khai báo các thông số đầu vào của mô hình.

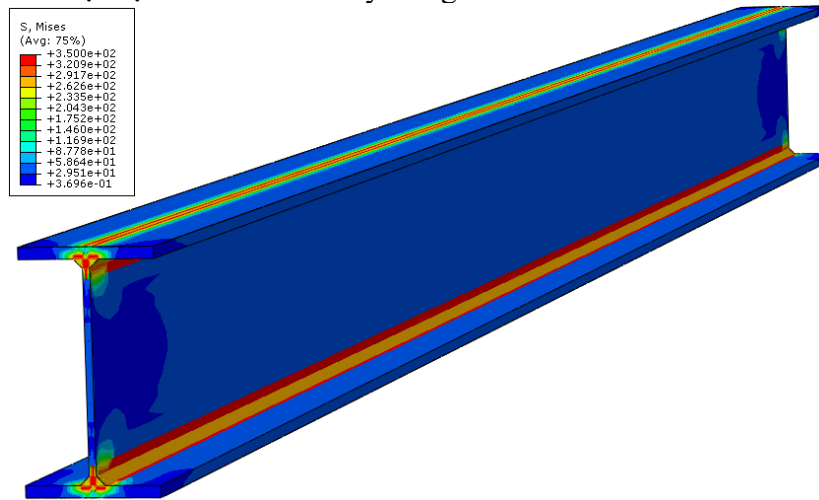
## 2.2. Phân tích kết quả và kiểm chứng mô hình

Quá trình gia nhiệt và nguội của mối hàn và sự phát sinh của ứng suất dư được thể hiện trong Hình 6. Có thể thấy một điều cơ bản là ứng suất dư xuất hiện cao ở khu vực quanh mối hàn và phát sinh ít hơn ở khu vực xa mối hàn. Khi nhiệt độ mối hàn tăng lên giá trị lớn nhất, ứng suất dư có xuất hiện nhưng với mật độ và độ lớn vừa phải. Khi mối hàn được giảm nhiệt từ nhiệt độ cao nhất tới giá trị nguội 0<sup>0</sup>C, ứng suất dư xuất hiện với mật độ cao hơn và độ lớn lớn hơn.



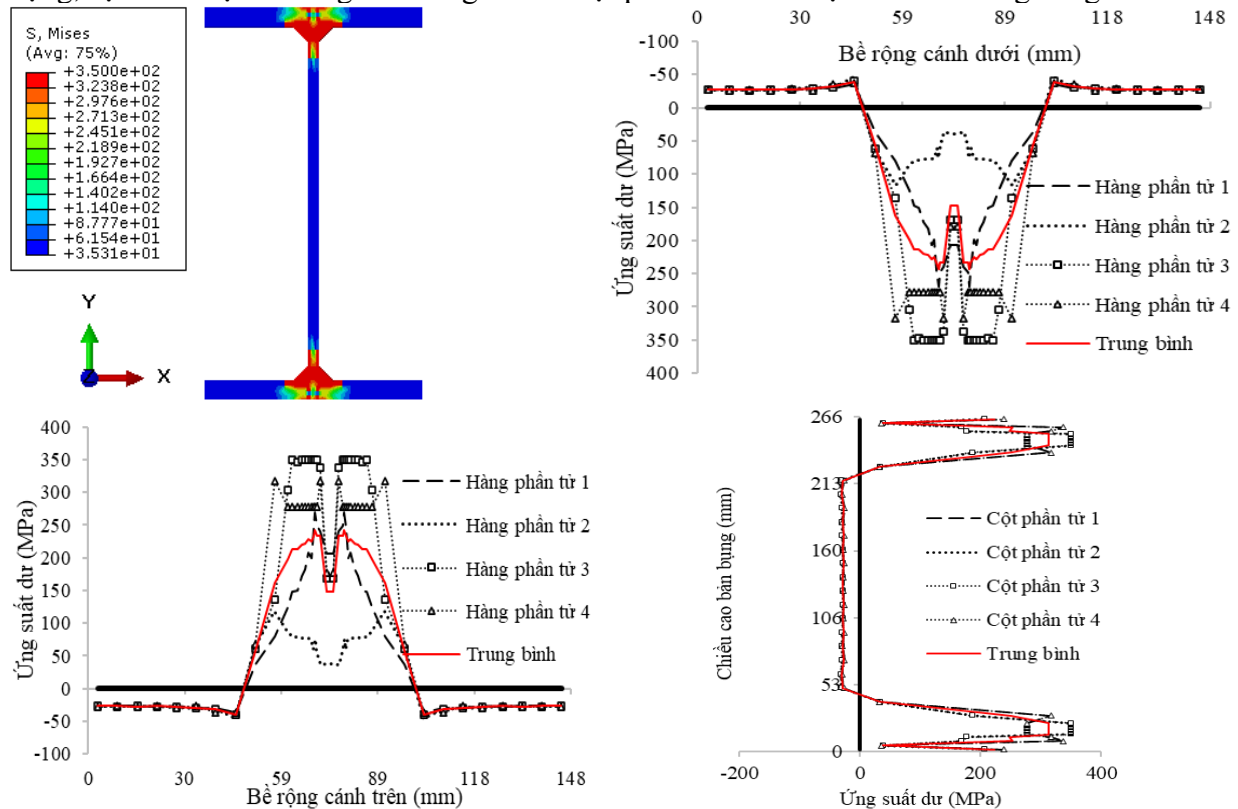
Hình 6. Phân bố ứng suất dư trong dầm ở các mức nhiệt độ khác nhau.

Kết quả của quá trình phân tích trên là ta thu được một kết cấu với ứng suất dư còn lại trong kết cấu dầm ở nhiệt độ 0°C như trình bày trong Hình 7.



Hình 7. Phân bố ứng suất dư trong dầm sau quá trình hàn.

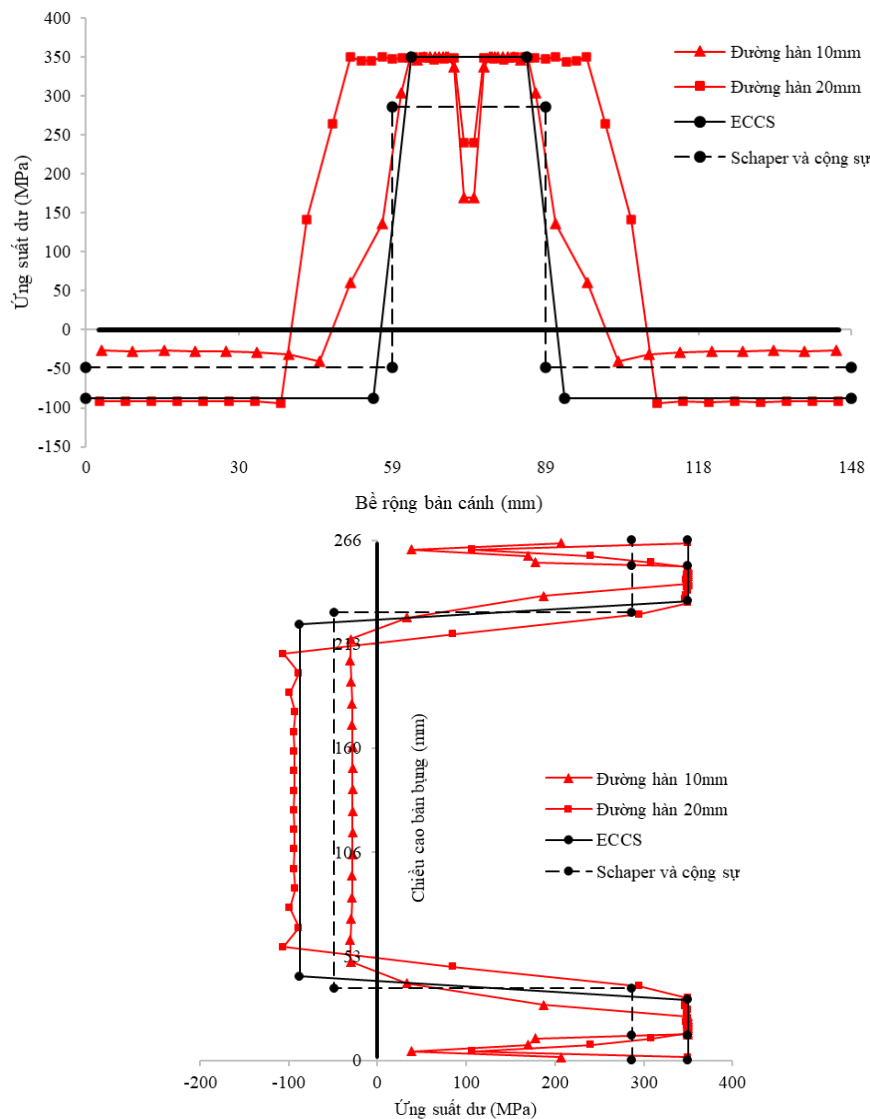
Hình 8 là kết quả biểu đồ ứng suất dư trong bản cánh trên, cánh dưới và bản bụng của các hàng phần tử, cột phần tử của dầm thép hàn tổ hợp sau quá trình hàn. Quan sát cho thấy ứng suất dư phân bố tập trung nhiều và cao ở khu vực mối nối hàn. Tuy nhiên, ứng suất dư phân bố theo chiều dày có vẻ không đều ở khu vực hàn. Phần vật liệu tương ứng với các hàng phần tử 1, 2 có nhiều ứng suất dư hơn phần vật liệu ứng với các hàng phần tử 3, 4. Đối với bản bụng, sự khác biệt của ứng suất dư giữa các cột phần tử ở khu vực hàn là không đáng kể.



Hình 8. Phân bố ứng suất dư ở cánh trên, cánh dưới, bản bụng.

Để kiểm chứng mô hình đã phát triển, một số mô hình sẵn có sẽ được tính toán và so sánh với kết quả ứng suất dư lớn nhất của mô hình hiện tại. Trong nghiên cứu này, mô hình để

xuất thiên về an toàn của tiêu chuẩn Châu Âu ECCS [11, 12] và mô hình đơn giản hóa của Schaper và cộng sự [10] được sử dụng cho việc kiểm chứng mô hình. Hình 9 thể hiện kết quả so sánh phân bố ứng suất dư trên bản cánh và bản bụng giữa các lời giải theo mô hình của Châu Âu ECCS, của Schaper và cộng sự, lời giải số hiện tại với các đường hàn kích thước chân  $b_h = h_h = 10 \text{ mm}$  và  $b_h = h_h = 20 \text{ mm}$ . Giữa các lời giải này, lời giải theo tiêu chuẩn Châu Âu ECCS được lấy làm lời giải tham chiếu để so sánh với các lời giải khác. Trong mô hình Châu Âu, giá trị đỉnh của ứng suất kéo bằng 350 MPa được quan sát ở khu vực giao cắt bản bụng và bản cánh. Còn các khu vực khác có ứng suất nén là -87,5 MPa. Đối với lời giải của Schaper và cộng sự, ta quan sát thấy giá trị đỉnh của ứng suất kéo cũng ở khu vực giao cắt bản bụng và bản cánh, nhưng có giá trị là 286,8 MPa, các khu vực khác có ứng suất nén là -48,5MPa. Như vậy, các ứng suất dư trong mô hình của Schaper và cộng sự là nhỏ hơn của mô hình Châu Âu ECCS. Mô hình đơn giản hóa của Schaper và cộng sự dựa trên sự điều chỉnh một số nghiên cứu thực nghiệm nên có thể không bao quát hết các trường hợp có thể xảy ra trong thực tế. Trong khi đó, mô hình của Châu Âu ECCS là mô hình giả thiết thiên về an toàn. Còn mô hình số hiện tại cho kết quả ứng suất dư chính xác theo dữ liệu cụ thể của nhiệt độ đường hàn gây ra.



Hình 9. So sánh biểu đồ ứng suất dư giữa mô hình số hiện tại và các lời giải sẵn có.



Trong mô hình của nghiên cứu hiện tại khi đường hàn là 10mm, giá trị đỉnh của ứng suất dư kéo là 350 MPa và cũng xảy ra ở khu vực giao cắt của bản bụng và bản cánh. Vùng ứng suất dư (bề rộng) trong mô hình của nghiên cứu hiện tại là phù hợp với vùng ứng suất dư của tiêu chuẩn Châu Âu ECCS. Đối với các khu vực khác, ứng suất dư là ứng suất nén có giá trị là -40,2 MPa. Giá trị này thấp hơn so với tiêu chuẩn Châu Âu ECCS, nhưng lại phù hợp với nghiên cứu thực nghiệm của Schaper và cộng sự.

Trong mô hình của nghiên cứu hiện tại khi đường hàn là 20 mm, giá trị đỉnh của ứng suất dư kéo là 350 MPa và cũng xảy ra ở khu vực giao cắt của bản bụng và bản cánh. Điều này cũng là phù hợp với tiêu chuẩn Châu Âu ECCS. Đối với các khu vực khác, ứng suất dư là ứng suất nén có giá trị là -91,8 MPa. Giá trị này lại phù hợp so với tiêu chuẩn Châu Âu ECCS. Lưu ý rằng đường hàn 20 mm là đường hàn khá to và gây ra bề rộng vùng ứng suất dư lớn hơn của tiêu chuẩn Châu Âu. Điều này cho thấy tiêu chuẩn Châu Âu có thể bao quát (nhưng không nhất thiết phải chính xác) ứng suất dư có thể phát sinh trong mối hàn trong các điều kiện mối hàn có kích thước lớn bất thường.

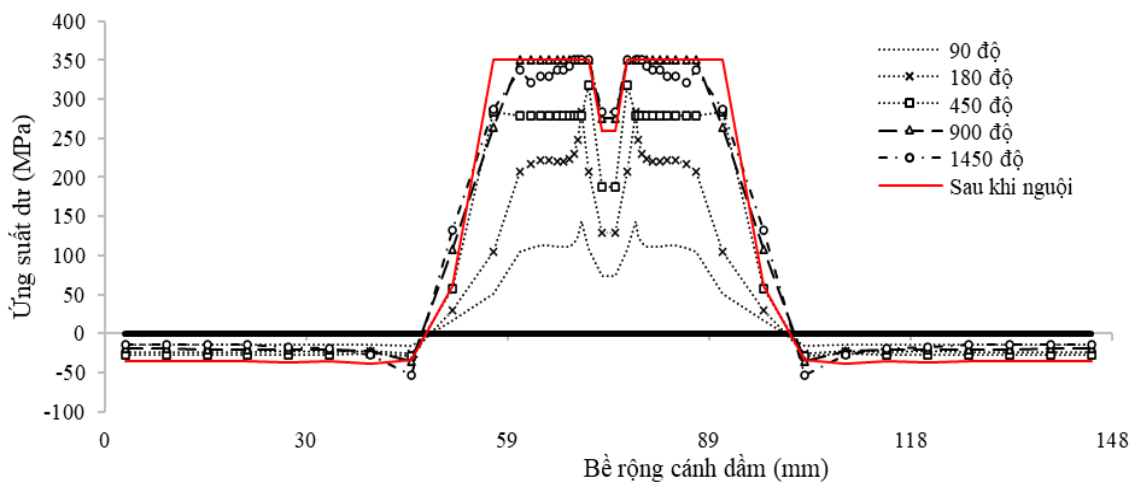
Qua so sánh nêu trên, có thể thấy mô hình ứng suất dư của nghiên cứu hiện tại là tin cậy, có kết quả phù hợp với tiêu chuẩn Châu Âu cũng như mô hình của Schaper.

### 3. ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ HÀN TỚI ỨNG SUẤT DƯ

Dựa trên mô hình đã xây dựng, ảnh hưởng của nhiệt độ hàn tới sự phân bố của ứng suất dư trong mối hàn được xem xét dưới đây.

#### 3.1 Ứng suất dư ở bản cánh dầm

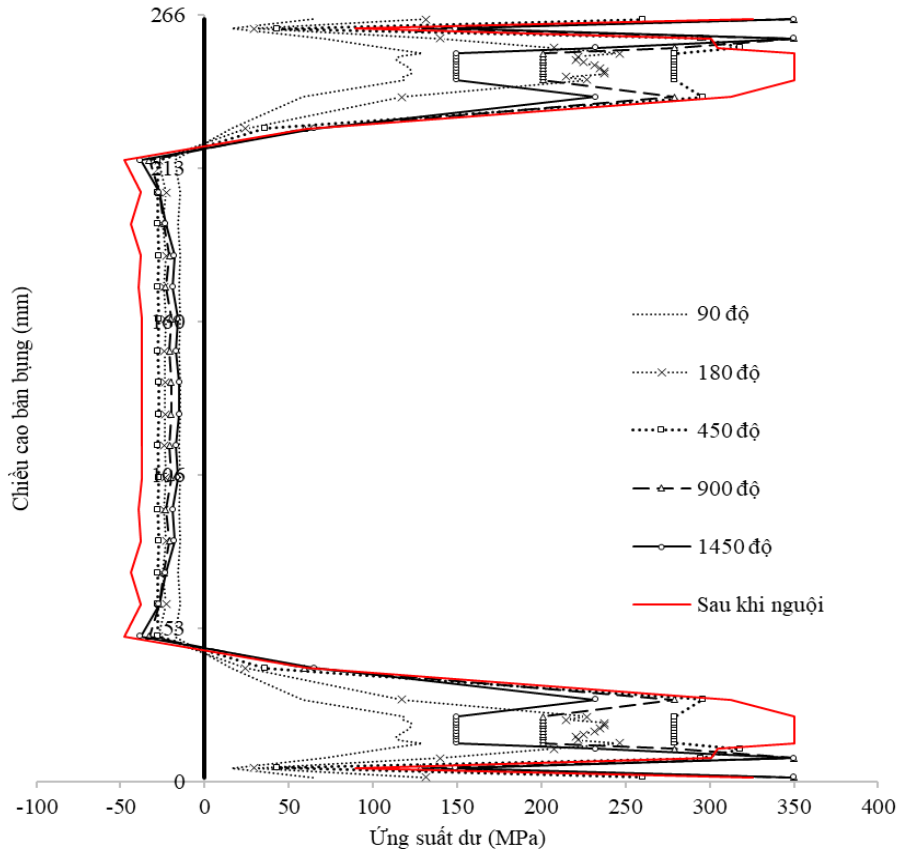
Các mối hàn với kích thước chân đường hàn 10 mm được xem xét. Hình 10 thể hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ hàn tới ứng suất dư trên bề rộng bản cánh dầm khi nhiệt độ tăng dần từ 0°C lên tới 1450°C và nguội dần về 0°C. Khi nhiệt độ hàn tăng lên mức 90°C, các ứng suất nhiệt trong thép phát sinh (ứng suất dư) nhưng các giá trị này vẫn còn thấp, ứng suất dư cao nhất quan sát được là khoảng 110 MPa. Khi nhiệt độ hàn tăng lên mức 180°C, ứng suất dư cao nhất là khoảng 220 MPa. Khi lên mức nhiệt 450°C, ứng suất dư cao nhất là khoảng 279 MPa. Khi nhiệt độ tăng tiếp từ 900°C tới 1450°C, ứng suất dư cao nhất đạt tới giới hạn chảy của thép. Khi nhiệt độ nguội dần về 0°C, ứng suất dư ổn định ở giới hạn chảy của thép.



Hình 10. Phân bố ứng suất tại bản cánh.

### 3.2 Ứng suất dư ở bản bụng dầm

Hình 11 thể hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ hàn tới ứng suất dư trong bản bụng dầm khi nhiệt độ tăng dần từ 0°C lên tới 1450°C và nguội dần về 0°C. Khi nhiệt độ hàn tăng lên mức 90°C, các ứng suất nhiệt trong thép phát sinh (ứng suất dư) nhưng các giá trị này vẫn còn thấp, ứng suất dư cao nhất quan sát được là khoảng 118 MPa. Khi nhiệt độ hàn tăng lên mức 180°C, ứng suất dư cao nhất là khoảng 245 MPa. Khi lên mức nhiệt 450°C, ứng suất dư cao nhất là khoảng 248 MPa. Khi nhiệt độ tăng tiếp từ 900°C tới 1450°C, ứng suất dư cao nhất đạt tới giới hạn chảy của thép. Khi nhiệt độ nguội dần về 0°C, ứng suất dư ổn định ở giới hạn chảy của thép.



Hình 11. Phân bố ứng suất tại bản bụng.

### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng một mô hình mô phỏng quá trình hàn dẫn đến sự hình thành ứng suất dư trong mối hàn nhiệt dựa trên phần mềm ABAQUS. Mô hình đã tính đến sự phụ thuộc của tính chất vật liệu tới nhiệt độ (tăng, lên đỉnh nhiệt, nguội). Mô hình xây dựng dựa trên các phần tử ba chiều nên cho kết quả sát với thực tế nhất. Kết quả ứng suất dư của mô hình đã được kiểm chứng thành công với một số tiêu chuẩn và nghiên cứu khác. Dựa trên mô hình số này, các ảnh hưởng của nhiệt độ tới sự hình thành, phát triển và tồn tại của ứng suất dư trong quá trình hàn được phân tích chi tiết. Kết quả phân tích cho thấy ứng suất dư phát sinh trong quá trình hàn của dầm chữ I là đáng kể. Ở các vùng giao nhau giữa bản cánh và bản bụng chịu ứng suất dư kéo chảy. Các vùng khác chịu ứng suất nén với giá trị gần như giống nhau ở các điểm trên cả bản cánh và bản bụng. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của nhiệt độ tới ứng suất dư là rõ

ràng và lớn. Khi nhiệt độ tăng dần thì ứng suất dư cũng tăng dần. Khi nhiệt độ giảm từ đỉnh tới nhiệt độ nguội, ứng suất dư không giảm và tồn tại trong khu vực hàn.

## LỜI CẢM ƠN

Các tác giả chân thành cảm ơn Bộ giáo dục và đào tạo đã tài trợ cho nghiên cứu này trong khuôn khổ đề tài mã số B2023- GHA- 06.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1 ]. T. Phùng, Sửa chữa nứt dầm cầu Vàm Cống cuối năm nay mới xong, 2018. <https://tuoitre.vn/sua-chua-nut-dam-cau-vam-cong-cuoi-nam-nay-moi-xong-20180605211059188.htm> (truy cập ngày 26 tháng 03 năm 2024).
- [2 ]. E.J. France, The Alexander L. Kielland Disaster Revisited: A Review by an Experienced Welding Engineer of the Catastrophic North Sea Platform Collapse. Journal of Failure Analysis and Prevention, 19 (2019) 875-881. <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00680-4>
- [3 ]. H.T. Ánh, N.H. Thanh, H.X. Hùng, N.T. Dương, Phân bố ứng suất dư và biến dạng khi hàn giáp mối hai tấm thép không gỉ AISI 304, Tạp chí khoa học giáo dục kỹ thuật, 25 (2018) 51-58. <https://jte.edu.vn/index.php/jte/article/download/356/295>
- [4 ]. N.H. Thanh, H. T. Ánh, N. T. Dương, H. X. Hùng, Dự đoán sự phân bố ứng suất dư và biến dạng khi hàn ống thép không gỉ 316L bằng phần mềm Sysweld, Hội nghị khoa học và công nghệ toàn quốc về cơ khí lần thứ V, (2018) 1-9.
- [5 ]. Z.H. Qian, D. Abruzzese, Fatigue failure of welded connections at orthotropic bridges, Fratture ed Integrita Strutturale, 9 (2009) 105-112. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.09.11>
- [6 ]. W. Ma, H. Zhang, W. Zhu, F. Xu, C. Tang, Study on Residual Stress of Welded Hoop Structure. Journal of Applied Sciences, 10 (2020) 2838. <https://doi.org/10.3390/app10082838>
- [7 ]. N.T. Thanh, Nghiên cứu trạng thái ứng suất dư trong liên kết hàn nút giàn dạng ống, luận án tiến sĩ, Trường Đại học Bách khoa Hà nội, 2019.
- [8 ]. M. Kubo, Y. Fukomoto, Lateral Torsional buckling of thin walled I beams. J. of Structural Engineering, 114 (1988) 841-855. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:4\(841\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:4(841))
- [9 ]. M.I. Kabir, A.K. Bhowmick, Lateral torsional buckling of welded wide flange beams. Proceedings of the annual stability conference, Structural Stability research council, Orlando, Florida, April 12<sup>th</sup> (2016). <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0499>
- [10 ]. L. Schaper, T Tankova, L.S. Silva, Knobloch M. A novel residual stress model for welded I-sections. J Constr Steel Res, 188 (2022) 107017. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107017>
- [11 ]. ECCS, Ultimate limit state calculation of sway frames with rigid joints, 1st ed. P033.ECCS technical committee 8 – structural stability, Brussels: European Convention of Constructional Steel Work; (1984).
- [12 ]. prEN 1993-1-14, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-14: Design By FE Analysis, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2019.
- [13 ]. P.V. Phe, X.N. Huy, Moment resistances of wide flange beams with initial imperfection and residual stress, Journal of Materials and Engineering Structures, 7 (2020) 651-658. <https://revue.ummto.dz/index.php/JMES/article/view/2488/0>
- [14 ]. A. Skyttebol, B.L. Josefson, J.W. Ringsberg, Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses, Engineering Fracture Mechanics, 72 (2005) 271–285. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.04.009>.