

# ẢNH HƯỞNG CỦA KHUYẾT TẬT BAN ĐẦU ĐẾN ĐỘ BỀN TỐI HẠN CỦA TẤM THÉP CÓ NẠP GIA CƯỜNG CHỊU NÉN DỌC

## THE INFLUENCE OF INITIAL IMPERFECTIONS ON THE ULTIMATE STRENGTH OF STEEL STIFFENED PANEL UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

ĐOÀN VĂN TUYỀN

Khoa Đóng tàu, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: [dvantuyen@vimaru.edu.vn](mailto:dvantuyen@vimaru.edu.vn)

### Tóm tắt

Sự tồn tại của khuyết tật ban đầu sau gia công trong kết cấu vỏ mỏng liên kết hàn là điều khó tránh khỏi. Do đó, trong nghiên cứu này, các dạng khuyết tật ban đầu và ảnh hưởng của chúng tới khả năng chịu tải của tấm có nẹp gia cường được trình bày tổng quan và thảo luận, đánh giá một cách chi tiết. Một loạt các phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến của tấm có nẹp gia cường chịu nén dọc khi kể và không kể đến sự có mặt của khuyết tật ban đầu được thực hiện trên phần mềm ANSYS. Kết quả chỉ ra rằng, biến dạng ban đầu không những ảnh hưởng đến hình dạng hư hỏng, mà còn làm thay đổi sự phân bố của ứng suất và làm giảm đáng kể độ bền tới hạn của kết cấu. Mức độ giảm độ bền tới hạn này còn lớn hơn khi kể đến cả ảnh hưởng của ứng suất dư do hàn.

**Từ khóa:** Độ bền tới hạn, tấm có nẹp gia cường, khuyết tật ban đầu, ứng suất dư do hàn.

### Abstract

The presence of initial imperfections in thin-walled structures fabricated by welding is inevitable. Hence, in this work, the types of initial imperfections and their influences on loading capacity of stiffened panels are comprehensively introduced, and deeply discussed and evaluated. A series of nonlinear finite element analyses of a stiffened panel with and without initial imperfections under uniaxial compression are performed using ANSYS software. It is seen that the existence of initial deflections not only drives the collapse mode, but also changes the stress distribution and reduces significantly the ultimate strength of the panel. This reduction of ultimate strength is larger in case of consideration the effect of welding-induced stresses.

**Keywords:** Ultimate strength, stiffened panel, Initial imperfections, welding-induced stress.

### 1. Giới thiệu

Kết cấu tấm có nẹp gia cường (stiffened panel, sau đây được gọi là panel) là thành phần kết cấu quan trọng được sử dụng rộng rãi trong kết cấu thân tàu và công trình ngoài khơi do có tỷ số “độ bền/ khối lượng kết cấu” lớn. Do độ bền của các panel ở đáy và boong tham gia chính vào độ bền chung nên sự phá hủy của các kết cấu này có thể kéo theo sự phá hủy kết cấu tổng thể. Khác với kết cấu cột chống, là kết cấu mà việc mất ổn định đồng nghĩa với việc phá hủy chung, kết cấu panel thường có thể chịu thêm tải sau khi bị mất ổn định kết cấu. Do vậy trong khoảng hai thập niên trở lại đây, việc thiết kế và đánh giá độ bền của kết cấu panel nói riêng và thân tàu nói chung dần chuyển sang đánh giá theo phương pháp trạng thái tới hạn [1].

Các nghiên cứu được thực hiện theo các phương pháp khác nhau đều chỉ ra rằng, ứng xử của kết cấu và độ bền tới hạn của tấm có nẹp gia cường chịu ảnh hưởng rất nhiều bởi các yếu tố bất định như đặc tính vật liệu, đặc trưng hình học, khuyết tật ban đầu, sự thay đổi về kết cấu, tải trọng, điều kiện biên, v.v. Thậm chí, kết quả tính toán giữa các tác giả có thể khác nhau khi thực hiện trên cùng một mô hình theo cùng một phương pháp, độ chính xác của bài toán phụ thuộc rất nhiều vào kinh nghiệm của người phân tích. Chính vì vậy, các nghiên cứu về ảnh hưởng của các yếu tố trên đến ứng xử của kết cấu cũng như độ bền tới hạn của panel là rất thiết thực và vẫn đang là chủ đề được nhiều tác giả trên thế giới quan tâm, đặc biệt là ảnh hưởng của khuyết tật ban đầu [2]. Ở bài báo này, tác giả trình bày tổng quan về các dạng khuyết tật ban đầu và ảnh hưởng của chúng đến ứng xử kết cấu và độ bền tới hạn của panel chịu nén dọc. Kết quả thu được từ bài toán phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến trên phần mềm ANSYS Mechanical APDL của mô hình kết cấu panel đáy ngoài của tàu hàng rời minh họa chi tiết các ảnh hưởng này.

### 2. Các dạng khuyết tật ban đầu

Kết cấu panel trên tàu hoặc công trình ngoài khơi phần lớn được tạo thành bằng phương pháp hàn, trong

đó các cơ cấu (nẹp và sóng) được hàn với tấm và hàn với nhau tại vị trí giao nhau (Hình 1). Trong khi hàn và sau hàn, vật liệu tại mỗi hàn và khu vực lân cận bị giãn nở do nung nóng và co lại khi nguội là không đồng đều làm cho panel bị biến dạng về hình dáng (hay cong vênh) và tồn tại ứng suất dư sau gia công. Thông thường, các khuyết tật sau gia công bao gồm độ lồi lõm cục bộ của tấm, độ vắn của nẹp, độ cong vênh của panel và ứng suất dư tại tấm và cơ cấu và thường được gọi chung là khuyết tật ban đầu do hàn. Hình 2 mô tả các loại biến dạng hình dáng và ứng suất dư do hàn của một panel điển hình sau gia công.

Rất nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã được thực hiện với các kim loại khác nhau nhằm đo đạc để xác định hình dạng và độ lớn của biến dạng hình dáng ban đầu cũng như trị số của ứng suất dư. Biến dạng hình dáng ban đầu của panel thường có dạng lượn sóng (hay “lộ sườn”, tiếng Anh là “thin horse”/“hungry horse”). Các biến dạng cục bộ của tấm, cơ cấu gia cường và tổng thể của cả panel có thể được biểu diễn gần đúng dưới dạng các hàm lượng giác [1, 3]. Cụ thể, công thức (1) - (3) lần lượt mô tả độ võng cục bộ của tấm giữa các nẹp, độ vắn của nẹp và độ vênh tổng thể của panel:

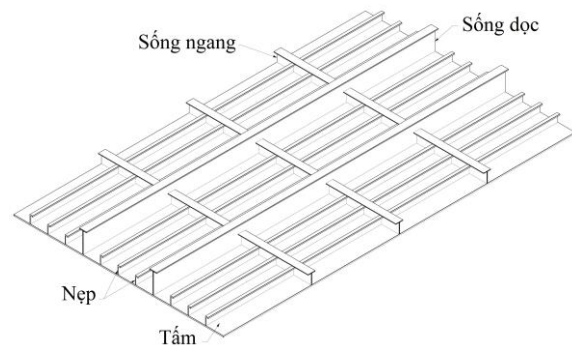
$$w_o^p = w_{opl} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}; \quad (1)$$

$$w_o^s = w_{os} \frac{z}{h_w} \sin \frac{\pi x}{a}; \quad (2)$$

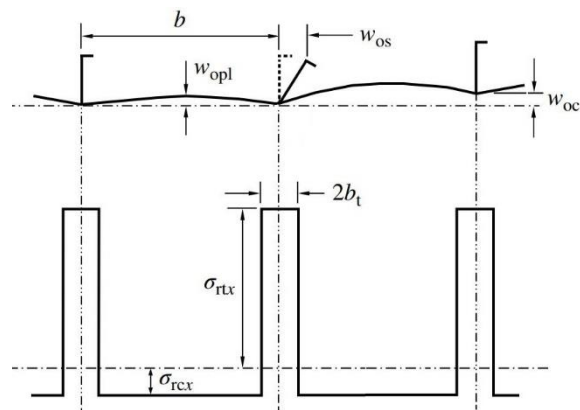
$$w_o^c = w_{oc} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{B}; \quad (3)$$

Trong đó:  $w_o^p, w_o^s, w_o^c$  - tương ứng là độ võng của tấm, độ vắn của nẹp, độ vênh của toàn panel;  $w_{opl}, w_{os}, w_{oc}$  - tương ứng là độ võng ban đầu lớn nhất của tấm, độ vắn ban đầu lớn nhất của nẹp và độ vênh ban đầu lớn nhất của panel;  $a, B, b$  - tương ứng là khoảng cách giữa các sóng ngang, sóng dọc và nẹp;  $m$  là số nửa bước sóng mất ổn định của tấm theo phương dọc, là số nguyên nhỏ nhất thỏa mãn điều kiện theo công thức (4) [1]; và  $h_w$  là chiều cao của nẹp,

$$\frac{a}{b} \leq \sqrt{m(m+1)} \quad (4)$$



**Hình 1. Kết cấu panel đặc trưng trên tàu và công trình biển**



**Hình 2. Khuyết tật ban đầu của panel sau gia công**

Thực tế, độ lớn của biến dạng hình dáng ban đầu thay đổi khá nhiều tùy thuộc vào nhiều yếu tố như phương pháp hàn, thông số hàn, đặc tính vật liệu, chiều dày tấm và trình độ tay nghề của người thi công. Thông thường, độ biến dạng được chia ra làm ba mức: Nhỏ, vừa và lớn. Trong Ngành Công nghiệp Đóng tàu và công trình ngoài khơi, tiêu chuẩn sau đây thường được sử dụng:

Với thép:

$$w_{opl} = \begin{cases} 0,025\beta^2 t & \text{mức nhỏ,} \\ 0,1\beta^2 t & \text{mức vừa,} \\ 0,3\beta^2 t & \text{mức lớn;} \end{cases} \quad (5)$$

$$w_{oc} = w_{os} = 0,0006a \div 0,0015a. \quad (6)$$

Với hợp kim nhôm:

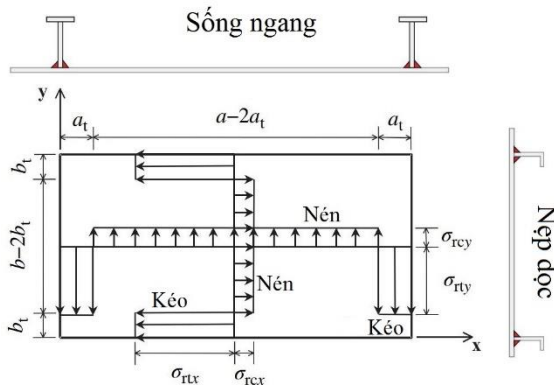
$$w_{opl} = \begin{cases} 0,018\beta^2 t & \text{mức nhỏ,} \\ 0,096\beta^2 t & \text{mức vừa,} \\ 0,252\beta^2 t & \text{mức lớn;} \end{cases} \quad (7)$$

$$w_{oc} = \begin{cases} 0,00016a & \text{mức nhỏ,} \\ 0,0018a & \text{mức vừa,} \\ 0,0056a & \text{mức lớn;} \end{cases} \quad (8)$$

$$w_{os} = \begin{cases} 0,00019a & \text{mức nhỏ,} \\ 0,001a & \text{mức vừa,} \\ 0,0024a & \text{mức lớn,} \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó:  $\beta = (b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$  là hệ số mảnh của tấm,  $t$  là chiều dày của tấm,  $\sigma_Y$  và  $E$  - tương ứng là giới hạn chảy và mô đun đàn hồi pháp tuyến của vật liệu. Ngoài ra, các tổ chức đăng kiểm còn đề xuất độ biến dạng lớn nhất của panel kết cấu thép:

$$w_{opl} = b/200; w_{oc} = w_{os} = 0,001a. \quad (10)$$



**Hình 3. Ứng suất dư trên tấm do hàn**

Trong khi đó, ứng suất dư sinh ra do hàn gồm ứng suất kéo ở vùng ảnh hưởng hàn và ứng suất nén ở khu vực lân cận (Hình 3). Trị số của ứng suất kéo/ nén theo các phương  $x/y$  ( $\sigma_{rtx}, \sigma_{rty}, \sigma_{rcx}, \sigma_{rcy}$ ) và chiều rộng vùng ảnh hưởng hàn  $a_1$  và  $b_1$  thỏa mãn điều kiện tự cân bằng lực, được biểu diễn qua mối quan hệ (11) hoặc (12). Với thép thông thường, độ lớn của ứng suất kéo  $\sigma_{rtx}, \sigma_{rty}$  bằng với giới hạn chảy, và bằng khoảng 80% giới hạn chảy với thép độ bền cao [4]. Còn với kết cấu hợp kim nhôm, ứng suất kéo bằng với giới hạn chảy của kim loại vùng ảnh hưởng hàn (khoảng 50%-70% giới hạn chảy của kim loại cơ bản) [5]. Ứng suất dư do hàn trên tấm và bản thành cơ cấu cũng được phân chia thành các mức nhỏ, vừa và lớn tương ứng với chiều rộng của vùng ảnh hưởng hàn.

$$2b_1 = \frac{\sigma_{rcx}}{\sigma_{rcx} - \sigma_{rtx}} b, \quad 2a_1 = \frac{\sigma_{rcy}}{\sigma_{rcy} - \sigma_{rty}} a; \quad (11)$$

$$\sigma_{rcx} = \frac{2b_1}{2b_1 - b} \sigma_{rtx}, \quad \sigma_{rcy} = \frac{2a_1}{2a_1 - a} \sigma_{rty}. \quad (12)$$

Có thể nhận thấy, biến dạng hình dáng ban đầu do hàn sẽ ảnh hưởng đến dạng mất ổn định và dạng hư hỏng của panel, còn ứng suất dư do hàn sẽ làm thay đổi sự phân bố của ứng suất trên tấm và cơ cấu gia cường khi chịu lực. Do đó, sự tồn tại của các khuyết tật ban đầu có thể dẫn tới sự thay đổi ứng xử kết cấu cũng như khả năng chịu tải của panel.

### 3. Ảnh hưởng của biến dạng hình dáng ban đầu đến độ bền tới hạn của panel chịu nén dọc

#### 3.1. Phương pháp nghiên cứu

Trong bài báo này, các bài toán phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến về độ bền tới hạn của panel đáy ngoài của tàu chở hàng rời kết cấu thép chịu nén dọc được thực hiện trên phần mềm phân tích phần tử hữu hạn ANSYS Mechanical APDL (ANSYS STUDENT 2021 R1), có đề ý đến tính chất phi tuyến cả về hình dáng và vật liệu. Các kết quả thu được từ bài toán trên mô hình có và không có khuyết tật ban đầu được phân tích, so sánh và đánh giá.

#### 3.2. Mô hình phân tích

Hình 4 thể hiện quy cách kết cấu của panel đáy ngoài: chiều dày tôn đáy 13mm, khoảng cách dầm dọc đáy  $b = 850\text{mm}$ , khoảng cách đà ngang  $a = 2550\text{mm}$ , quy cách dầm dọc đáy T235 $\times$ 10/90 $\times$ 15. Tuy nhiên, sóng dọc và đà ngang không được mô phỏng, ảnh hưởng của chúng được thay thế bằng các điều kiện biên phù hợp tại vị trí giao nhau với tấm và giao với dầm dọc. Vật liệu là thép AH32, có giới hạn chảy  $\sigma_Y$ , mô đun đàn hồi pháp tuyến  $E$  và hệ số Poisson  $\nu$  tương ứng là 313,6MPa, 2,058GPa và 0,3 [6, 7].

Mô hình phân tích sử dụng phần tử tấm bốn nút SHELL181, kích thước phần tử được lựa chọn với tấm là 50mm, còn với nẹp, số lượng phần tử trên bản thành là 10 và bản cánh là 2 theo đề xuất của [8, 9]. Có thể nhận thấy, kích thước phần tử như trên là đủ để mô tả một cách chính xác biến dạng của mô hình mà không mất quá nhiều thời gian tính toán và phù hợp với giới hạn số lượng phần tử tối đa của phần mềm Ansys phiên bản đào tạo.

Kích thước mô hình theo hai phương được lựa chọn là  $(\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2})$  lần khoảng cách các cơ cấu khỏe. Điều kiện biên tại hai mép ngang là tuần hoàn [10], tại hai mép dọc là dịch chuyển ngang đều, tại vị trí đà ngang và sóng dọc là tựa tự do, và bản thành dầm dọc được coi là giữ nguyên tư thế tại vị trí giao với đà ngang, cụ thể như sau:

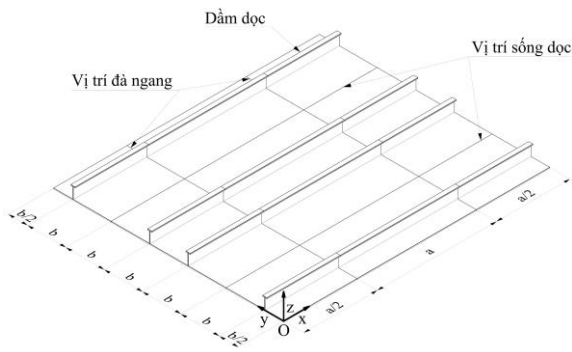
$$\text{Tại } x = 0 \text{ và } x = 2a: u_{x2a} = 0, u_{y0} = u_{y2a}, u_{z0} = u_{z2a}, \text{rot}x_0 = \text{rot}x_{2a}, \text{rot}y_0 = \text{rot}y_{2a}, \text{rot}z_0 = \text{rot}z_{2a};$$

$$\text{Tại } y = 0, y = 6b: \text{cùng } u_y;$$

$$\text{Tại } y = 3b/2: u_y = 0, u_z = 0;$$

$$\text{Tại } y = 9b/2: u_z = 0;$$

$$\text{Tại } x = a/2 \text{ và } x = 3a/2 \text{ trên tấm: } u_z = 0; \text{ trên cơ cấu: } \text{rot}y = 0, \text{rot}z = 0.$$



**Hình 4. Mô hình kết cấu panel đáy ngoài**

### 3.3. Biến dạng hình dáng ban đầu

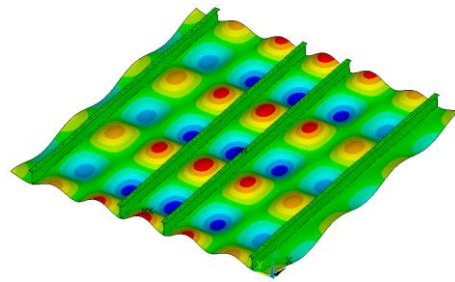
Hiện nay, trong phân tích kết cấu thường sử dụng bốn phương pháp để mô phỏng biến dạng hình dáng ban đầu của panel, gồm: Đo biến dạng thực tế sau gia công, phân tích đàn hồi tuyến tính dưới tác dụng của áp lực mặt, tổ hợp các biến dạng được biểu diễn thông qua các hàm lượng giác (công thức (1) - (3)), và phân tích các dạng mất ổn định đặc trưng. Ở đây, tác giả sử dụng phương pháp phân tích các dạng mất ổn định đặc trưng, là phương pháp thường được các nhà nghiên cứu lựa chọn do mô tả được gần nhất với biến dạng hình dáng ban đầu của panel làm từ thép. Hình 5 biểu diễn hình dáng biến dạng ban đầu cục bộ của tấm, nẹp và tổng thể của panel. Biến dạng lớn nhất được lựa chọn bằng ở mức vừa, cụ thể:  $w_{opl} = b/200 = 4,25\text{mm}$  và  $w_{os} = w_{oc} = 0,001a = 4,1\text{mm}$ .

### 3.4. Kết quả và thảo luận

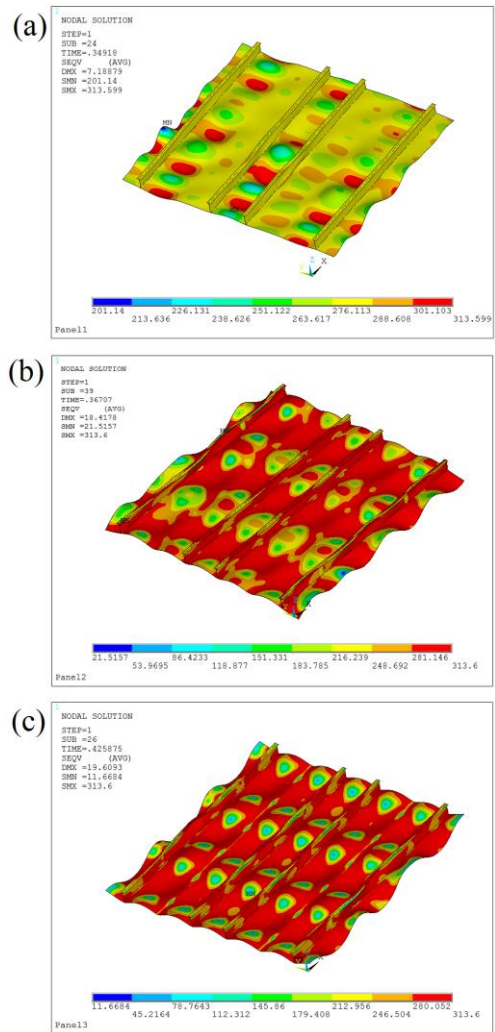
Hình 6 và 7 thể hiện hình dáng biến dạng và phân bố ứng suất tương đương tại trạng thái tới hạn và mối quan hệ ứng suất - biến dạng của panel khi không kể đến khuyết tật ban đầu (Panel1), khi kể đến biến dạng hình dáng mà không kể đến ứng suất dư do hàn (Panel2) và khi kể đến cả biến dạng ban đầu và ứng suất dư (Panel3). Có thể nhận thấy, mặc dù sự hư hỏng của các panel đều chung xuất phát điểm từ sự mất ổn định của tấm, nhưng sự ảnh hưởng khuyết tật ban đầu đến ứng xử của kết cấu, đến sự phân bố ứng suất và độ bền tới hạn của panel là rất rõ ràng.

Cụ thể, hình dáng biến dạng Panel2 (Hình 6, b) và Panel3 (Hình 6, c) là gần như nhau và giống với hình dáng của biến dạng hình dáng ban đầu (Hình 5). Trong khi đó hình dáng biến dạng của Panel1 (Hình 6, a) lại hoàn toàn khác biệt. Sự phân bố của ứng suất tương đương tại trạng thái tới hạn cho thấy sự khác biệt rõ nét. Với Panel1, ứng suất lớn nhất tập trung tại vị trí giữa tấm, tuy nhiên phân bố không đồng đều trên toàn bộ panel. Còn với Panel2 và Panel3 ứng suất lớn nhất phân bố tại giữa tấm và trên bản thành của dầm dọc

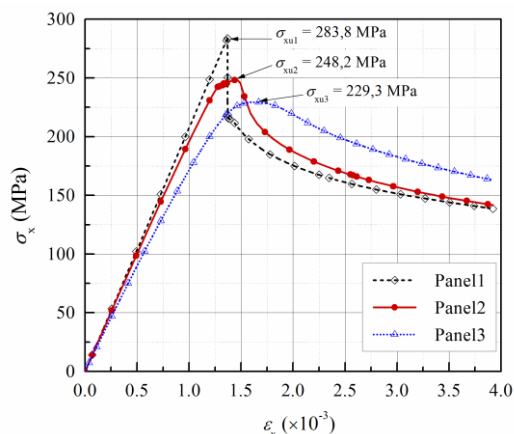
khá đồng đều, ứng suất trên Panel3 phân bố đồng đều hơn so với Panel2. Điều này chứng tỏ hình dáng của biến dạng ban đầu có ảnh hưởng lớn đến hình dáng biến dạng của panel khi hư hỏng và sự phân bố của ứng suất. Trong khi đó, sự tồn tại của ứng suất dư do hàn làm cho ứng suất trên panel phân bố đồng đều hơn và không ảnh hưởng nhiều đến hình dáng biến dạng của panel khi hư hỏng.



**Hình 5. Hình dáng biến dạng ban đầu của panel**



**Hình 6. Biến dạng và phân bố ứng suất tại trạng thái tới hạn: (a) Panel1; (b) Panel2; (c) Panel3.**



Hình 7. Biểu đồ ứng suất - biến dạng

Từ đường cong biểu diễn mối quan hệ giữa ứng suất nén dọc trung bình và biến dạng  $\sigma_x$ - $\epsilon$  của panel (Hình 7), có thể thấy rõ sự khác biệt rất lớn khi có và không có khuyết tật ban đầu. Mặc dù, cả ba đường cong đều gồm ba giai đoạn: Giai đoạn tuyến tính, giai đoạn từ khi xuất hiện sự mất ổn định đến khi ứng suất đạt giá trị tới hạn và giai đoạn sau khi đạt giá trị tới hạn, nhưng thời điểm và cách thức chuyển tiếp từ giai đoạn này sang giai đoạn kia là không giống nhau.

Với panel không có khuyết tật ban đầu (Panel1), quan hệ giữa ứng suất và biến dạng gần như là tuyến tính cho đến khi ứng suất đạt giá trị tới hạn. Ngay sau đó, ứng suất giảm một cách đột ngột, rồi giảm dần dần ở giai đoạn cuối. Với panel chỉ kể đến khuyết tật hình dáng ban đầu (Panel2), thời điểm chuyển tiếp từ giai đoạn 1 sang giai đoạn 2 là không rõ ràng, tới gần cuối giai đoạn 2 mới thấy rõ sự khác biệt, lúc đó, ứng suất dao động nhẹ cho đến đạt giá trị tới hạn. Qua thời điểm này, ứng suất giảm tương đối nhanh trong một khoảng nhỏ rồi giảm dần dần. Còn với Panel3 khi để ý đến cả biến dạng hình dáng và ứng suất dư do hàn thì sự thay đổi của ứng suất qua các giai đoạn diễn ra một cách dần dần.

Ngoài ra còn nhận thấy rõ, độ bền tới hạn của panel giảm khá lớn khi có sự xuất hiện của khuyết tật ban đầu. Ứng suất tới hạn của panel giảm từ 283,8MPa xuống 248,2MPa (khoảng 12,5%) khi có biến dạng hình dáng ban đầu và giảm khoảng 19,2% (từ 283,8MPa xuống 229,3MPa) khi kể đến ảnh hưởng của cả biến dạng hình dáng và ứng suất dư do hàn. Sự sai lệch về ứng suất tới hạn giữa Panel2 và Panel3 (khoảng 7%) cho thấy ảnh hưởng của ứng suất dư đến khả năng chịu tải của panel là rất đáng kể.

#### 4. Kết luận

Thực tế chỉ ra rằng, sự tồn tại của khuyết tật ban đầu là không thể tránh khỏi với kết cấu hàn sau gia

công. Vì vậy, các dạng khuyết tật ban đầu và ảnh hưởng của chúng đến ứng xử và độ bền tới hạn của panel chịu nén dọc đã được trình bày một cách chi tiết trong bài báo này. Kết quả phân tích phi tuyến độ bền tới hạn của panel đáy ngoài tàu hàng rời chịu nén dọc khi có kể và không kể đến ảnh hưởng của biến dạng hình dáng ban đầu và ứng suất dư do hàn đã chỉ ra rằng: Hình dáng hư hỏng của panel ở trạng thái tới hạn tương đồng với hình dáng của biến dạng ban đầu. Ứng suất phát sinh trên tấm và cơ cấu gia cường của panel khi chịu lực chịu ảnh hưởng khá nhiều không những của biến dạng hình dáng ban đầu mà còn của ứng suất dư do hàn. Các khuyết tật ban đầu do hàn làm thay đổi rất nhiều ứng xử của kết cấu khi chịu lực. So với kết cấu không có khuyết tật ban đầu, ứng suất tới hạn (hay độ bền tới hạn) của panel giảm tới 12,5% khi kể đến ảnh hưởng của biến dạng hình dáng ban đầu và giảm tới 19,2% khi kể đến cả ảnh hưởng của ứng suất dư do hàn. Chính vì vậy, các khuyết tật ban đầu cần phải được đưa vào trong các tính toán độ bền tới hạn của kết cấu.

Các nhận định ở trên sẽ được củng cố thêm khi số lượng mô hình phân tích cũng như chủng loại tàu được mở rộng. Điều này sẽ được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT20-21.21.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. K. Paik, *Ultimate limit state analysis and design of plated structures*, 2 ed.: John Wiley & Sons, 2018.
- [2] D. K. Kim, H. L. Lim, and S. Y. Yu, *A technical review on ultimate strength prediction of stiffened panels in axial compression*, Ocean Engineering, Vol.170, pp.392-406, 2018.
- [3] T. Yao and M. Fujikubo, *Buckling and ultimate strength of ship and ship-like floating structures*: Elsevier, 2016.
- [4] J. K. Paik and J. M. Sohn, *Effects of welding residual stresses on high tensile plate ultimate strength: nonlinear finite element method investigations*, In: Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), Hawaii, USA, 2009.
- [5] M. D. Collette, *The impact of fusion welds on the ultimate strength of aluminum structures*, In:

- Proceedings of the 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Texas, USA, 2007.
- [6] S. Tanaka, D. Yanagihara, A. Yasuoka, M. Harada, S. Okazawa, M. Fujikubo, and T. Yao, *Evaluation of ultimate strength of stiffened panels under longitudinal thrust*, Marine Structures, Vol.36, pp.21-50, 2014.
- [7] Lloyd's Register, *Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials*, 2019.
- [8] American Bureau of Shipping, *Guidance notes on Nonlinear finite element analysis of marine and offshore structures*, 2020.
- [9] Lloyd's Register, *ShipRight Design and Construction: Additional design procedures of Non-linear structural collapse analysis for plates and stiffened panels*, 2016.
- [10] V. T. Doan, B. Liu, Y. Garbatov, W. Wu, and C. Guedes Soares, *Strength assessment of aluminium and steel stiffened panels with openings on longitudinal girders*, Ocean Engineering, Vol.200, p.107047, 2020.

Ngày nhận bài: 25/5/2021

Ngày nhận bản sửa: 03/6/2021

Ngày duyệt đăng: 08/6/2021