

Nghiên cứu phương pháp đánh giá tổn thương mỏi tích lũy kết cấu, ứng dụng cho tàu thủy và công trình nổi

Research on methods for assessing cumulative fatigue damage in structures, with applications to ships and offshore structures

1st Lê Tuấn Vũ

Phòng Thiết kế Cơ Bản Thân Tàu
Công ty TNHH Marine
Engineering Bluetech Việt Nam
Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam
vu.le@bluetechfinland.com

2nd Đỗ Hùng Chiến

Viện Hàng Hải
Trường Đại học Giao thông vận
tải Tp. Hồ Chí Minh
Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam
chien.do@ut.edu.vn

Tóm tắt: Trong vài thập kỷ qua, việc xác định và đánh giá các đặc trưng mỏi của chi tiết chịu ứng suất phức tạp đã thu hút sự quan tâm đáng kể trong lĩnh vực cơ học và kỹ thuật. Hiện nay, các phương pháp đánh giá tuổi thọ mỏi của chi tiết này có thể được phân loại thành ba nhóm chính: phương pháp ứng suất - biến dạng tương đương [1-2], phương pháp năng lượng [3], và phương pháp mặt phẳng tới hạn [4-6]. Bên cạnh đó, phương pháp phạm vi phân phối ứng suất (Stress Range Distribution - SRD) cũng nổi lên như một công cụ hữu ích. [7] Kết hợp với một chương trình hỗ trợ được xây dựng bằng ngôn ngữ lập trình C#, phương pháp SRD không chỉ giúp xác định và đánh giá tổn thương mỏi của kết cấu mà còn hỗ trợ phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến tổn thương và tuổi thọ mỏi của kết cấu đó.

Từ khóa: Đánh giá độ bền mỏi, Ứng suất mỏi, Phương pháp phạm vi phân phối ứng suất (SRD), Kết cấu tàu thủy, kết cấu công trình ngoài khơi, tuổi thọ mỏi kết cấu, tổn thương mỏi kết cấu.

Abstract: In the realm of mechanical and structural engineering, the identification and evaluation of fatigue characteristics in components subjected to complex stress states have garnered substantial research interest over the past several decades. Currently, methodologies for assessing the fatigue life of these components can be categorized into three primary groups: equivalent stress-strain methods [1-2], energy methods [3], and critical plane methods [4-6]. In addition to these established approaches, the stress range distribution (SRD) method has emerged as a promising tool in the field. [7] When combined with a supporting program developed in C#, the SRD method not only enables the identification and evaluation of fatigue damage within structures but also facilitates the analysis of factors contributing to fatigue damage and the prediction of the overall fatigue life of those structures.

Keywords: Fatigue strength assessment, Fatigue stress, Stress range distribution (SRD) method, Ship structures, Offshore structures, Structural fatigue life, Structural fatigue damage.

I. GIỚI THIỆU

Hiện nay, các lý thuyết và phương pháp đánh giá tuổi thọ mỏi của kết cấu đã được nghiên cứu khá bài bản và đạt được nhiều kết quả khả quan. Ở giai đoạn đầu, để đơn giản hóa vấn đề, các nghiên cứu sử dụng mô hình ứng suất - biến dạng đơn có ảnh hưởng chính (bỏ qua các thành phần phân ứng suất - biến dạng còn lại) để tính toán và dự đoán tuổi thọ mỏi của kết cấu. Tuy nhiên, thực tế các chi tiết, kết cấu trong quá trình làm việc hầu hết đều chịu tác dụng của tải trọng phức tạp dẫn đến trạng thái ứng suất trong chi tiết, kết cấu không phải ở trạng thái ứng suất đơn. Hơn nữa, các yếu tố đặc biệt về hình dạng và sự không đồng nhất về vật liệu của chi tiết, kết cấu càng làm cho trạng thái ứng suất trong kết cấu trở nên phức tạp hơn [1]. Trong và ngoài nước cũng đã có nhiều nghiên cứu liên quan đến tổn thương mỏi kết cấu bằng nhiều phương pháp khác nhau.

Đề tài khoa học cấp bộ: “Nghiên cứu đánh giá tuổi thọ mỏi của công trình biển di động hoạt động trong thềm lục địa Việt Nam” do TS. Đỗ Hùng Chiến làm chủ nhiệm đề tài đã cơ bản tìm ra hướng giải quyết các bài toán xác định tải trọng môi trường tác động lên công trình biển do nhóm nghiên cứu viết trên nền của MATLAB, qua đó có thể xác định được hệ số tập trung ứng suất và tiến hành phân tích mỏi để xác định được tổn thương mỏi và tuổi thọ mỏi của kết cấu. Đề tài đã đánh giá tổn thương mỏi tích lũy cho giàn khoan tự nâng Tam Đảo 01 tại Vũng Tàu, góp phần nâng cao tuổi thọ và đảm bảo an toàn cho công trình. [8-10]

Nhóm tác giả: Đỗ Văn Sĩ, Bùi Mạnh Cường, Tạ Văn San trong nghiên cứu “Xác định giới hạn bền mỏi của chi tiết chịu ứng suất phức tạp bằng phương pháp số đã trình bày kết quả tính toán giới hạn bền mỏi của chi tiết chịu ứng suất phức tạp bằng phương pháp số. Trường ứng suất phức tạp được chuyển đổi thành trường ứng suất tương đương để tính giới hạn bền mỏi dựa trên các tiêu chí khác nhau. Kết quả tính toán được so sánh với

kết quả thử nghiệm và tiêu chuẩn quốc tế để xác định tiêu chí nào là phù hợp nhất cho đánh giá giới hạn bền mỏi của chi tiết chịu ứng suất phức tạp. [11]

Bài báo “Tính toán mức tăng tuổi thọ của kết cấu sau rung khử ứng suất dư theo các giả thuyết khác nhau” của nhóm tác giả Đỗ Văn Sĩ, Bùi Mạnh Cường và Nguyễn Văn Dương trình bày kết quả nghiên cứu về ứng dụng công nghệ rung khử ứng suất dư trong tính toán và khảo sát về mức độ tăng tuổi thọ mỏi của kết cấu. Mô hình tích lũy tổn thương mỏi tuyến tính theo phương pháp của Miner được áp dụng với ứng suất dư đóng vai trò quan trọng. [7]

Nhóm tác giả: Byoung-Hoon Jung, In-Gyu Ahn, Sun-Kee Seo và Beom-Il Kim trong nghiên cứu “Fatigue Assessment of Very Large Container Ships Considering Springing Effect Based on Stochastic Approach” đã xây dựng một phương pháp đánh giá độ bền mỏi xem xét thành phần co giãn tuyến tính trong miền tần số. Dựa trên một mô hình toàn cầu ba chiều, thực hiện phân tích tương tác cơ - cấu và áp dụng phương pháp kết hợp các mode để xác định ứng suất điểm nóng tại góc hầm của tàu chở container rất lớn. Phá hủy mỏi được ước tính trực tiếp bằng cách sử dụng hàm chuyển đổi ứng suất với phản ứng co giãn tuyến tính. [12]

Nhóm tác giả Wolfgang Fricke, Hans Paetzold với đề tài nghiên cứu “Full-scale fatigue tests of ship structures to validate the S-N approaches for fatigue strength assessment” tập trung vào việc thực hiện các thử nghiệm độ bền mỏi quy mô đầy đủ trên các cấu trúc tàu thủy và công trình nổi để xác nhận các phương pháp đánh giá sức mệt mỏi dựa trên đường cong S-N. Bài nghiên cứu này nhấn mạnh đến vấn đề độ bền mỏi của các kết cấu tàu thủy và công trình nổi dựa trên đường cong S-N, vì chúng phải chịu những tải trọng tuần hoàn cao trong các điều kiện hàng hải. Tuy nhiên, đối với việc đánh giá độ bền mỏi của các kết cấu này có nhiều phương pháp khác nhau và không đồng nhất. Vì vậy, để hài hòa các phương pháp đánh giá độ bền mỏi, các thử nghiệm độ bền mỏi quy mô đầy đủ đã được thực hiện ở Đức trong một dự án nghiên cứu chung của ngành công nghiệp đóng tàu. [13]

Các nghiên cứu trên đã đưa ra một số vấn đề và thách thức quan trọng trong việc đánh giá độ bền mỏi của các kết cấu. Dưới đây là một số điểm chính được thể hiện:

- Sử dụng phương pháp số: Một số nghiên cứu đều nhấn mạnh việc sử dụng phương pháp số để đánh giá độ bền mỏi của các kết cấu. Phương pháp phần tử hữu hạn, như trong trường hợp sử dụng phần mềm ANSYS, được áp dụng để mô phỏng ứng suất và trường ứng suất trong các kết cấu chịu ứng suất phức tạp.
- Chênh lệch giữa ứng suất đơn và ứng suất tương đương Von Mises: Một trong những vấn đề quan trọng là sự chênh lệch giữa việc sử dụng ứng suất đơn và ứng suất tương đương Von Mises. Khi kết cấu chịu ứng suất phức tạp, sử dụng ứng suất đơn có thể dẫn đến sai lệch lớn, trong khi ứng suất tương đương Von Mises giữ được độ chính xác cao.
- Đánh giá chi tiết và chất lượng đường hàn: Trong nghiên cứu về độ bền mỏi của cửa van, vấn đề của khuyết tật tại các đường hàn và chất lượng của chúng được nhấn mạnh.

Cần phải xem xét chi tiết cho tất cả các nút giàn và kiểm tra tính toán mỏi cho từng nút, đặc biệt là khi xem xét chất lượng của đường hàn.

- Tính toán độ bền mỏi dựa trên các tiêu chí khác nhau: Các nghiên cứu đã thực hiện tính toán độ bền mỏi của các kết cấu dựa trên nhiều tiêu chí khác nhau như ứng suất - biến dạng tương đương, năng lượng, và mặt phẳng tới hạn. Sự đa dạng này thể hiện sự phức tạp trong quá trình đánh giá độ bền mỏi.
- Thách thức từ áp lực nước biển đổi: Trong việc đánh giá độ bền mỏi của cấu trúc cửa van, sự biến đổi không ngừng của áp lực nước trong các điều kiện làm việc hai chiều tạo ra thách thức đối với các kết nối hàn giữa các thanh giàn.
- Sự chênh lệch giữa mô hình hóa và thực nghiệm: Nghiên cứu về tăng tuổi thọ của kết cấu sau rung khử ứng suất thúc đẩy sự chênh lệch giữa mô hình hóa và thực nghiệm, đặc biệt khi sử dụng các lý thuyết khác nhau để tính toán mức tăng tuổi thọ mỏi cho kết cấu.

Như vậy, các vấn đề này thể hiện sự phức tạp và đa dạng trong quá trình đánh giá độ bền mỏi của các kết cấu, đặc biệt khi chúng đối mặt với các điều kiện tải trọng động, sự biến đổi không gian, môi trường, vật liệu, ... Điều này đòi hỏi cần sự kết hợp giữa các phương pháp khác nhau, các nghiên cứu khác nhau qua đó đưa ra được giá trị có thể đảm bảo được độ tin cậy.

Do đó, đề tài “Nghiên cứu phương pháp đánh giá tổn thương mỏi tích lũy kết cấu, ứng dụng cho tàu thủy và công trình nổi” được ra đời và phân tích thêm một phương pháp có thể đánh giá được thiệt hại do mỏi gây ra trong quá trình hoạt động của tàu thủy và công trình nổi, đồng thời có thể dự đoán được tuổi thọ của kết cấu nhằm có các biện pháp phù hợp bảo vệ kết cấu.

II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

A. Phương pháp phạm vi phân phối ứng suất

Phương pháp phạm vi phân phối ứng suất (SRD) giúp xác định các khoảng ứng suất tại các điểm nóng trên kết cấu, mô phỏng các biến đổi độ bền mỏi trong một khoảng thời gian và điều kiện hoạt động khác nhau. Khi đánh giá độ bền mỏi của kết cấu tàu, có nhiều yếu tố tác động đến độ bền mỏi như tải trọng động, tình trạng sóng biển, nhiệt độ môi trường và thời gian hoạt động, Sử dụng phương pháp SRD giúp tính toán chính xác các ứng suất tại các điểm nóng trong suốt quá trình hoạt động của tàu, từ đó định lượng hiệu quả độ mỏi và tuổi thọ của kết cấu.

Sơ đồ thuật toán nhằm tính toán thiệt hại mỏi và tuổi thọ mỏi theo như hình 1. Để tính toán, cần có các dữ liệu đường cong S-N, hệ số hình dạng weibull, giá trị ứng suất danh nghĩa, giá trị hệ số tập trung ứng suất, và các hệ số liên quan đến đường cong S-N, các giá trị về độ dày kết cấu, thời gian phục vụ kết cấu. [14]

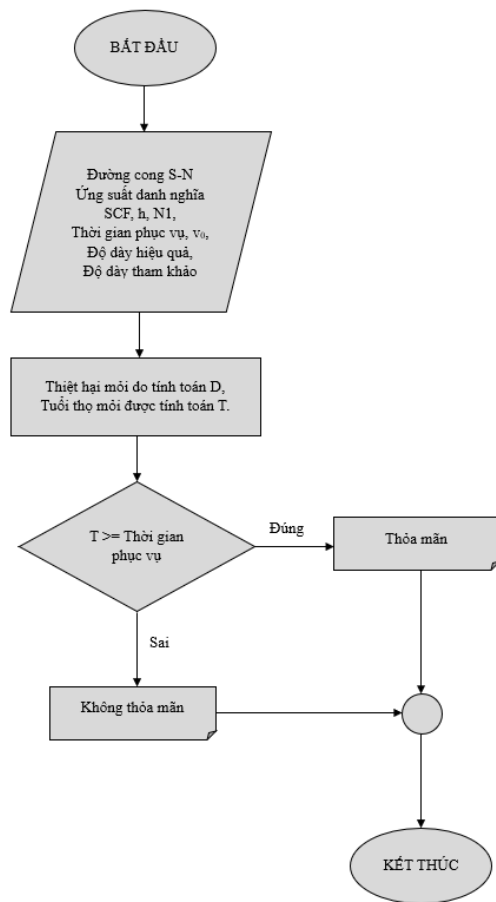
- Giá trị ứng suất danh nghĩa được xác định dựa theo phân tích độ bền kết cấu với phần mềm hỗ trợ Ansys.

- Hệ số tập trung ứng suất SCF: $K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$

- Hệ số hình dạng weibull được xác định trong khoảng từ 0.5 cho đến 1.3 cụ thể như bảng 1.

BẢNG I. BẢNG THẺ HIỆN HỆ SỐ HÌNH DẠNG WEIBULL TRONG CÁC KHU VỰC VÀ ĐIỀU KIỆN KẾT CẤU KHÁC NHAU

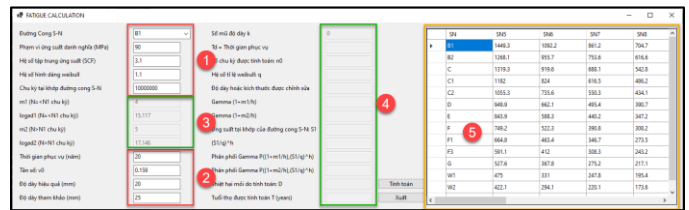
STT	Hệ số hình dạng Weibull	Khu vực và điều kiện kết cấu
1	0.5	Căn cứ cố định ở vùng biển vịnh Mexico và truss spars
2	0.7	Dầm dưới mặt nước và cán sóng động ở vùng biển vịnh Mexico và cảng chân vừng
3	1	Cho biển Bắc, biển Đông và California Nam (cố định sóng)
4	1.3	Cho biển Bắc, biển Đông và California Nam (động) và Châu Phi



HÌNH I. SƠ ĐỒ THUẬT TOÁN TÍNH TOÁN TỒN THƯƠNG MÔI TÍCH LŨY KẾT CẤU

B. Xây dựng chương trình tính toán

Chương trình tính toán được xây dựng dựa trên sơ đồ thuật toán hình 1. Giao diện của chương trình tính toán như hình 2



HÌNH II. GIAO DIỆN CỦA CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN

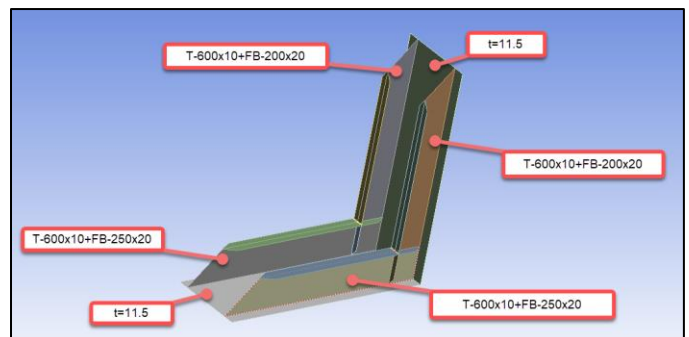
- Các khu vực 1, 2 (khu vực màu đỏ) là các khu vực điền hoặc chọn các giá trị đã được tính toán.
- Các khu vực 3, 4 (khu vực màu xanh lá cây) là các khu vực mà giá trị được tự động tính toán ra dựa trên các thông số được điền vào từ khu vực 1, 2.
- Khu vực 5 (khu vực màu da cam) là khu vực thể hiện các thông số cụ thể của đường cong S-N, nơi chúng ta có thể lựa chọn đường cong S-N phù hợp trong tính toán.

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU TỒN THƯƠNG MÔI TÍCH LŨY KẾT CẤU

A. Mô hình tính toán

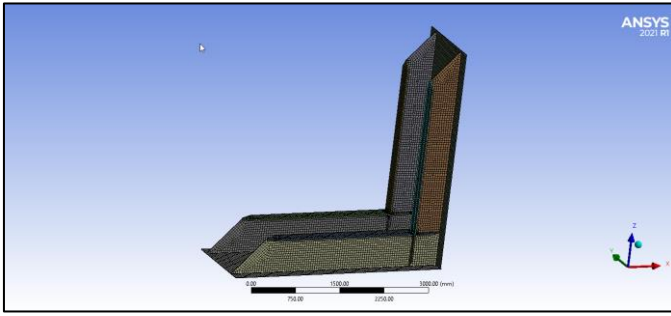
Dựa trên kết cấu của các tàu ro/ro hiện tại, đã chọn một góc nối khung sườn của mạn tàu và boong tàu. Các góc khung sườn này là các phần tử trong mặt cắt ngang của tàu, chúng chủ yếu chịu tác động của uốn do tải trọng tàu và các tác động ngoại lực. Sau đó tiến hành tính toán mô phỏng để có được các giá trị ban đầu, làm dữ liệu phục vụ việc tính toán và phân tích tiếp theo đối với việc nghiên cứu về độ bền môi. [15-31]

Chiều cao bản thành của các khung sườn hình chữ T này là 600mm và bản cánh của chúng được tạo thành từ các thanh thẳng 250x20 (đối với thanh liên tục) và 200x20 (đối với thanh gián đoạn). Mô hình mô phỏng ở đây là một góc với hai khung sườn cách nhau 1000mm. Và các thanh chữ T này được lắp đặt trên một tấm với chiều dày $t=11.5\text{mm}$.



HÌNH III. GÓC KHUNG SƯỜN ĐƯỢC NGHIÊN CỨU

Lực tác động chủ yếu là lực kéo theo đường chéo tạo ra một momen uốn cùng với lực dọc trục trong cả 2 khung sườn, do đó khung sườn chủ yếu chịu tải uốn. Mỗi lực kéo tác dụng có giá trị 125kN, như vậy tổng lực kéo tác động 250kN.



HÌNH IV. MÔ HÌNH CHIA LƯỚI KHUNG SƯỜN

- Kết quả ứng suất danh nghĩa (nominal stress):
 $\sigma_{nom} = 29.5MPa$

- Kết quả ứng suất lớn nhất: $\sigma_{max} = 90MPa$

- Hệ số tập trung ứng suất (SCF):

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{90}{29.5} = 3.1$$

Dựa vào phần cơ sở lý thuyết để tính toán độ bền mỏi tàu thủy và công trình nổi và các thông số đầu vào, ta có thể xác định một số thông số khác cụ thể như sau:

- Đối với hệ số hình dạng Weibull, ta có thể giả sử hệ số này trải dài từ 0.5 cho đến 1.3 để xác định ảnh hưởng của hệ số đến việc tính toán độ bền mỏi của kết cấu.
- Thời gian phục vụ (Year in service): 20 năm.
- Độ dày hiệu quả: 20 mm
- Độ dày tham khảo: 25 mm.

B. Phân tích và đánh giá tuổi thọ mỏi kết cấu.

Kết quả tính toán được tính toán theo 4 trường hợp:

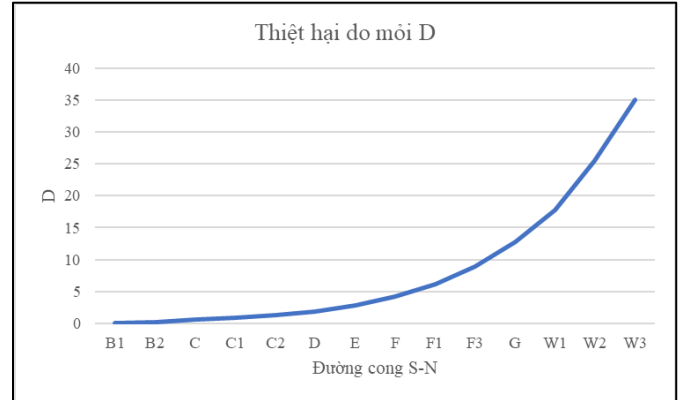
- Trường hợp 1: Giữ nguyên hệ số hình dạng Weibull là 1.1, thay đổi các giá trị của đường cong S-N.
- Trường hợp 2: Giữ nguyên đường cong S-N là B1, thay đổi các giá trị của hệ số hình dạng Weibull.

1) Trường hợp 1: Giữ nguyên hệ số hình dạng Weibull là 1.1, thay đổi các giá trị của đường cong S-N

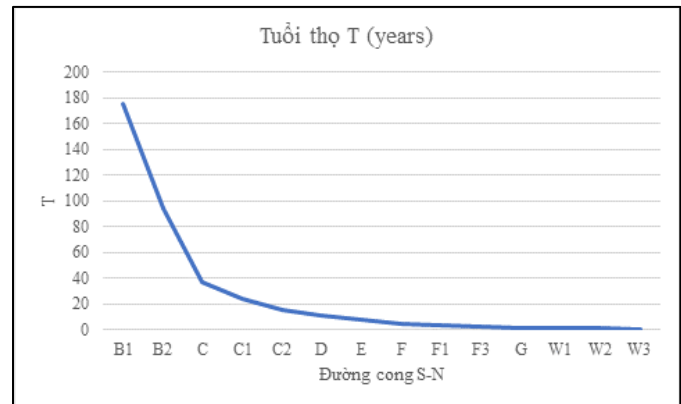
BẢNG II. BẢNG THỂ HIỆN ẢNH HƯỞNG CỦA LOẠI ĐƯỜNG CONG S-N LÊN TUỔI THỌ VÀ TỔN THƯƠNG MÔI CỦA KẾT CẤU

Điểm nóng kết cấu	Đường cong S-N	Hệ số Weibull	Thiệt hại môi do tính toán	Tuổi thọ được tính toán	Đánh giá
1	B1	1.1	0.114	175.755	Thỏa mãn
2	B2	1.1	0.212	94.144	Thỏa mãn
3	C	1.1	0.546	36.637	Thỏa mãn
4	C1	1.1	0.835	23.95	Thỏa mãn
5	C2	1.1	1.272	15.718	Không thỏa mãn
6	D	1.1	1.854	10.786	Không thỏa mãn
7	E	1.1	2.789	7.17	Không thỏa mãn

8	F	1.1	4.157	4.812	Không thỏa mãn
9	F1	1.1	6.142	3.256	Không thỏa mãn
10	F3	1.1	8.939	2.237	Không thỏa mãn
11	G	1.1	12.772	1.566	Không thỏa mãn
12	W1	1.1	17.703	1.13	Không thỏa mãn
13	W2	1.1	25.461	0.786	Không thỏa mãn
14	W3	1.1	35.1	0.57	Không thỏa mãn



HÌNH V. ĐỒ THỊ THỂ HIỆN SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA LOẠI ĐƯỜNG CONG S-N ĐẾN THIẾT HẠI MÔI DO TÍNH TOÁN



HÌNH VI. ĐỒ THỊ THỂ HIỆN SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA LOẠI ĐƯỜNG CONG S-N ĐẾN TUỔI THỌ TÍNH TOÁN

Hai đồ thị hình V, hình VI và bảng II cho thấy việc lựa chọn loại đường cong S-N là rất quan trọng trong việc xác định tổn thương và tuổi thọ môi. Các đường cong B1, B2, C, C1 trong cùng hệ số Weibull và các thông số khác cho ra tuổi thọ môi thỏa mãn điều kiện lớn hơn số năm phục vụ là 20 năm. Các đường cong C2, D,... cho đến W2, W3 trong cùng các thông số lại không thỏa mãn điều kiện tuổi thọ môi lớn hơn số năm phục vụ. Như vậy, với việc lựa chọn đường cong S-N khác nhau sẽ cho ra các giá trị về tổn thương môi và tuổi thọ môi khác nhau.

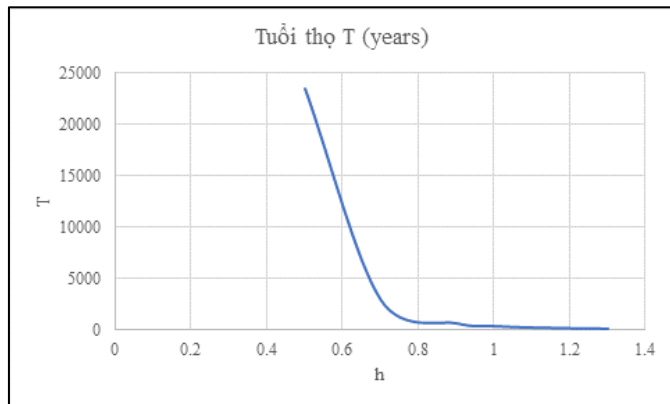
2) Giữ nguyên đường cong S-N là B1, thay đổi các giá trị của hệ số hình dạng Weibull.

BẢNG III. BẢNG THỂ HIỆN ẢNH HƯỞNG CỦA HỆ SỐ WEIBULL LÊN TUỔI THỌ VÀ TỶ LỆ TỒN THƯƠNG MÔI CỦA KẾT CẤU

Đường cong S-N	Hệ số Weibull	Số năm phục vụ	Tổn thương môi D	Tuổi thọ môi T	Đánh giá
B1	0.5	20	0.001	23465	Thỏa mãn
B1	0.7	20	0.007	2875	Thỏa mãn
B1	0.9	20	0.034	589.27	Thỏa mãn
B1	1	20	0.065	309.54	Thỏa mãn
B1	1.1	20	0.114	175.755	Thỏa mãn
B1	1.2	20	0.188	106.526	Thỏa mãn
B1	1.3	20	0.293	68.223	Thỏa mãn



HÌNH VII. ĐỒ THỊ THỂ HIỆN SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA HỆ SỐ HÌNH DẠNG WEIBULL ĐẾN THIẾT HẠI MÔI DO TÍNH TOÁN



HÌNH VIII. ĐỒ THỊ THỂ HIỆN SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA HỆ SỐ HÌNH DẠNG WEIBULL ĐẾN TUỔI THỌ TÍNH TOÁN

Đối với trường hợp thay đổi hệ số hình dạng Weibull, tuổi thọ và thiết hại do môi cũng có sự thay đổi rõ rệt khi hệ số được tăng lên hoặc giảm xuống. Hệ số này phụ thuộc vào khu vực mà tàu hoặc các thiết bị này hoạt động, phụ thuộc vào vị trí kết cấu. Giá trị hệ số hình dạng Weibull càng cao thì thiết hại do môi càng lớn, đồng thời tuổi thọ môi sẽ càng giảm (Xem bảng III).

IV. THẢO LUẬN

A. Kết luận

Đề tài "Nghiên cứu phương pháp đánh giá tổn thương môi tích lũy kết cấu, ứng dụng cho tàu thủy và công trình nổi." Đã làm rõ các nội dung sau:

- Đã nêu ra được các kết quả nghiên cứu liên quan đến độ bền môi của các nhà khoa học trong và ngoài nước, trong các nghiên cứu này đã nêu ra được các phương pháp được sử dụng để đánh giá độ bền môi của kết cấu, và cũng có nghiên cứu nêu ra các vấn đề liên quan đến tuổi thọ kết cấu.
- Đã xây dựng được chương trình hỗ trợ tính toán, dựa trên ngôn ngữ C# với sự hỗ trợ của Visual Studio phiên bản Community 2022.
- Mô phỏng được mô hình kết cấu và xác định được ứng suất khi kết cấu bị lực tác dụng dưới sự hỗ trợ của phần mềm ANSYS.
- Sử dụng chương trình hỗ trợ tính toán và các kết quả xuất ra từ Ansys để tính toán được các giá trị liên quan đến độ bền môi và tuổi thọ của kết cấu tàu.
- Bài báo cũng đã có những đánh giá về các yếu tố tác động đến độ bền môi của kết cấu, tuổi thọ của kết cấu

B. Kiến nghị

- Chương trình hỗ trợ tính toán đang được xây dựng một cách đơn giản, tiếp tục phát triển xây dựng theo hướng đa nhiệm hơn, có thể xuất ra được đồ thị để hạn chế các bước tính toán dựa trên những phần mềm khác.
- Có thể mở rộng tính toán thêm các thông số trong từng sự thay đổi để có được phổ thay đổi rộng hơn và có cái nhìn tổng thể hơn trong việc xác định sự ảnh hưởng của các yếu tố đến độ bền môi kết cấu. Ví dụ trong trường hợp 2, chỉ tính toán trong điều kiện lựa chọn đường cong S-N là B1, có thể mở rộng tính toán cho các giá trị đường cong S-N khác để có nhiều hơn các kết quả để so sánh và phân tích.

- [1] L. D. Zhu S.P, Correia J.A, De Jesus A.M, Wang Q., "Recent advances on size effect in metal fatigue under defect: a review,," *Internatinal Journal of Fracture*, pp. 1-23, 2021
- [2] Yang W.H., "A generalized von mises criterion for yield and fracture,," *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, vol. 47, pp. 297-300, 1980.
- [3] Mrozinski S., "Energy-based method of fatigue damage cumulation,," *Internatinal Journal of Fatigue*, vol. 121, pp. 73-83, 2019.
- [4] S. D. F. Fatemi A., "A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading,," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 11, pp. 149-165, 1988.
- [5] Findley W.N., "A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torison and axial load or bending,," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 81, pp. 301-305, 1959.
- [6] B. M. C. Đỗ Văn Sĩ, Tạ Văn San, "Xác định môi của chi tiết chịu ứng suất phức tạp bằng phương pháp số,," *Tạp chí Khoa học Công nghệ - Trường đại học công nghiệp Hà Nội*, vol. 58, pp. 62-65, 2022.
- [7] B. M. C. Đỗ Văn Sĩ, Nguyễn Văn Dương, "Tính toán mức tăng tuổi thọ môi của kết cấu sau rung khử ứng suất dư theo các giả thuyết khác nhau,," *Tạp chí Khoa học Công nghệ - Trường đại học công nghiệp Hà Nội*, vol. 57, pp. 58-63, 2021
- [8] P. V. C. Lê Việt Trung, "Tổng quan về ngành công nghiệp dầu khí Việt Nam,," *Tạp chí dầu khí - số 4/2016*, 2016.
- [9] P. V. Khôi, *Tuổi thọ môi của kết cấu thép ngoài biển*: NXB Khoa học và Kỹ Thuật Hà Nội, 1997.

- [10] Đ. H. Chiến, “Nghiên cứu đánh giá tuổi thọ mỏi của công trình biển di động hoạt động trong thềm lục địa Việt Nam,” *Đề tài nghiên cứu khoa học và công nghệ cấp Bộ*, 2018.
- [11] B. M. C. Đỗ Văn Sĩ, Tạ Văn San, Vũ Công Hàm, Nguyễn Hữu Chiến, Đào Văn Lưu, “Phương pháp số và thực nghiệm đánh giá đặc trưng bền mỏi của chi tiết máy khi chịu trạng thái ứng suất phức tạp,” *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật*, pp. 32-45, 2022.
- [12] I.-G. A. Byoung-Hoon Jung, Sun-Kee Seo, Beom-Il Kim, “Fatigue Assessment of Very Large Container Ships Considering Springing Effect Based on Stochastic Approach,” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 34(2), pp. 120-127, 2020
- [13] H. P. Wolfgang Fricke., “Full-scale fatigue tests of ship structures to validate the S–N approaches for fatigue strength assessment,” *Maritime Structure*, 2010.
- [14] I. Lotsberg, *FATIGUE DESIGN OF MARINE STRUCTURES*: Cambridge University Press, 2016
- [15] W. J. Hung Chien Do, Jianxin Jin, Xuedong Chen, “Ultimate Limit State Assessment of Stiffened Panel Structures for Very Large Ore Carrier via Nonlinear Finite Element Method,” *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH)*, vol. Vol.2, No.2, May 2013, 2013.
- [16] W. J. Hung Chien Do, Jianxin Jin, “Estimation of Ultimate Limit State for Stiffened-Plates Structures: Applying for a Very Large Ore Carrier Structures Designed by IACS Common Structural Rules,” *Applied Mechanics and Materials*, 2013.
- [17] T. C. Nghi, *Sức bền tàu thủy*: Nhà xuất bản Đại học quốc gia thành phố Hồ Chí Minh, 2014.
- [18] T. C. Nghi, *Tính toán thiết kế kết cấu tàu* NXB Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh, 2008.
- [19] T. C. Nghi, *Cơ học kết cấu*: NXB Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh, 2008.
- [20] Đ. H. C. Trần Công Nghi, *Phương pháp tính cơ học kết cấu tàu thủy*: NXB Đại học Giao thông vận tải Tp. Hồ Chí Minh, 2008.
- [21] Đ. H. Chiến, “Nghiên cứu sự tập trung ứng suất tại một số kết cấu cục bộ tiêu biểu trên tàu thủy và công trình nổi,” *Báo cáo KH tại hội nghị Khoa học Công nghệ lần thứ 14 ĐH Bách Khoa TP HCM* 2015.
- [22] Đ. H. Chiến, “Nghiên cứu phương pháp đánh giá độ bền giới hạn cho kết cấu tấm vỏ thép gia cường vùng đáy tàu,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ - Trường đại học Giao thông vận tải*, 2015.
- [23] A. B. o. S. I. b. A. o. L. o. t. S. o. N. York, “Guide for fatigue assessment of offshore structures,” vol. 2003. p. 1 - 56, 2014.
- [24] A. A. Barltrop NDP, *Dynamics of fixed marine structures.*, 1991.
- [25] A. Almar-Naess, “Fatigue Handbook, Offshore Steel Structure,” no. Tapir, Norway, 1985.
- [26] S. Suresh, *Fatigue of Materials*, Cambridge Press, 1991.
- [27] ISSC, 1991, 1994, 1997, 2000, 2003, 2006, 2009, 2012, 2015, *Fatigue and fracture*, Report of technical Committee III.2. In: Proceedings of the International Ship and Offshore Structures Congress.
- [28] T. Xu, “Fatigue of ship structural details e technical development and problems,” *Journal of Ship Research*, vol. SNAME 41 (4), pp. 318-331, 1997.
- [29] W. Fricke, Petershagen, H., Paetzold, H., , *Fatigue Strength of Ship Structures*, 1997.
- [30] W. J. Hung Chien Do, Jianxin Jin, Xuedong Chen, “Investigation of Ultimate Strength for VLOC Stiffened Panel Structures,” *Modern Transportation*, 2013.
- [31] V. T. C. Hung-Chien Do, “An assessment of MSC solutions for ship structural design and analysis,” *Journal of Mechanical Engineering and Applications*, vol. 3 (1-3), pp. 47-53, 2015.