

TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI THÀNH PHỐ HCM



LÊ TUẤN VŨ

**NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ TỔN
THƯƠNG MỖI TÍCH LŨY KẾT CẤU, ỨNG
DỤNG CHO TÀU THỦY VÀ CÔNG TRÌNH NỒI.**

LUẬN VĂN THẠC SỸ

Ngành: Kỹ thuật tàu thủy

Mã số: 8520122

Thành phố Hồ Chí Minh tháng 3 năm 2024

TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI THÀNH PHỐ HCM



LÊ TUẤN VŨ

**NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ TỔN
THƯƠNG MỖI TÍCH LŨY KẾT CẤU, ỨNG
DỤNG CHO TÀU THỦY VÀ CÔNG TRÌNH NỒI.**

LUẬN VĂN THẠC SỸ

Ngành: Kỹ thuật tàu thủy

Mã số: 8520122

NGƯỜI HƯỚNG DẪN: TS. ĐỖ HÙNG CHIẾN

Thành phố Hồ Chí Minh tháng 3 năm 2024

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan:

Luận văn: “Nghiên cứu phương pháp đánh giá tổn thương môi tích lũy kết cấu, ứng dụng cho tàu thủy và công trình nổi.”

1. Là công trình nghiên cứu của bản thân tôi được đúc kết từ quá trình học tập và nghiên cứu dưới sự hướng dẫn của TS. Đỗ Hùng Chiến.

2. Số liệu và kết quả trong luận văn nghiên cứu là trung thực và chưa được công bố trong bất cứ công trình nào khác.

Tôi cũng xin cam đoan rằng mọi sự giúp đỡ cho việc thực hiện luận văn này đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn trong luận văn đã được chỉ rõ nguồn gốc.

Tôi xin hoàn toàn chịu trách nhiệm về nghiên cứu của mình.

Thành phố Hồ Chí Minh ngày 25 tháng 02 năm 2024

Học viên thực hiện

Lê Tuấn Vũ

LỜI CẢM ƠN

Trong thời đại không ngừng của sự phát triển về mặt công nghệ, và sự phát triển nhanh chóng của nhiều lĩnh vực trong đó có hàng hải, việc nghiên cứu và áp dụng về độ bền mỏi trong tính toán, thiết kế tàu thủy và công trình nổi đã trở thành một hướng nghiên cứu vô cùng quan trọng để đảm bảo được sự an toàn và tối ưu hóa thời gian sửa chữa tàu thủy cũng như công trình nổi. Đối mặt với vấn đề này, luận văn: "**Nghiên cứu phương pháp đánh giá tổn thương mỏi tích lũy kết cấu, ứng dụng cho tàu thủy và công trình nổi.**" đã được tiến hành với sự hướng dẫn và hỗ trợ nhiệt tình và tận tâm từ quý thầy cô thuộc trường đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh.

Trong quá trình thực hiện luận văn, tôi đã được sự hướng dẫn bởi TS. Đỗ Hùng Chiến. Sự hiểu biết sâu rộng, kiến thức giàu có và tinh thần hỗ trợ không ngừng nghỉ từ Thầy đã giúp em xác định hướng đi chính xác và tiến xa hơn trong nghiên cứu của mình.

Việc nghiên cứu về phương pháp đánh giá tổn thương mỏi tích lũy kết cấu không chỉ là một thách thức mà còn là một cơ hội để đóng góp vào sự phát triển an toàn và hiệu quả của ngành công nghiệp hàng hải. Tôi biết ơn vô cùng đến sự hỗ trợ và sự chỉ dẫn tận tâm từ các giáo viên tại trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, đặc biệt là TS. Đỗ Hùng Chiến, người đã chia sẻ kiến thức và kinh nghiệm quý báu của mình.

Luận văn không chỉ là một dự án nghiên cứu mà còn là một hành trình học tập và phát triển cá nhân. Tôi tin rằng những kiến thức và kỹ năng thu được từ luận văn sẽ là nguồn động viên lớn, giúp tôi đóng góp tích cực vào sự phát triển bền vững và an toàn của ngành công nghiệp hàng hải và công trình nổi.

Thành phố Hồ Chí Minh ngày 25 tháng 02 năm 2024
Học viên thực hiện

Lê Tuấn Vũ

MỤC LỤC

PHẦN MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU	5
1.1 Tổng quan về nghiên cứu trong nước.	5
1.1.1 Xác định giới hạn bền mỗi bằng phương pháp số.....	5
1.1.2 Nghiên cứu tính toán độ bền mỗi kết cấu thép.	6
1.1.3 Nghiên cứu về vấn đề tăng tuổi thọ kết cấu	8
1.2 Tổng quan về các nghiên cứu nước ngoài.	9
1.2.1 Tiếp cận phương pháp sử dụng đường cong S-N để đánh giá độ bền mỗi.	9
1.2.2 Đánh giá độ bền mỗi của tàu Container rất lớn	10
1.2.3 Đánh giá độ bền mỗi của hệ thống chứa hàng LNG	11
1.3 Tổng kết	12
CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ LUẬN	14
2.1 Cơ sở lý thuyết của phương pháp phạm vi phân phối ứng suất.....	14
2.1.1 Phân bố Weibull và phạm vi ứng suất dài hạn.....	14
2.1.2 Các biểu thức cho sự phá hủy mỗi dựa trên phân phối Weibull của biên độ ứng suất.....	15
2.1.3 Biểu thức cho sự phá hủy mỗi dựa trên phân phối Rayleigh của biên độ ứng suất.	18
2.1.4 Ví dụ về việc sử dụng biểu thức cho mỗi trong các bảng tính toán dựa trên đường cong S-N Bilinear.....	19
2.1.5 Xác suất bị vượt quá.....	21
2.1.6 Phạm vi ứng suất tối đa cho phép.	23
2.1.7 Quy trình tải trọng và phản ứng kết hợp	27
2.1.8 Phân tích độ bền mỗi của đường ống	28
2.2 Xây dựng chương trình tính toán	31
2.2.1 Hàm LoadData	31
2.2.2 Hàm sự kiện nút Calculate	32
2.2.3 Hàm Gamma	34
2.2.4 Hàm Incompletegamma	35
2.2.5 Chương trình tính toán	36
CHƯƠNG 3 NỘI DUNG, KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU	40

3.1	Mô hình tính toán và thông số đầu vào.....	40
3.1.1	Mô hình tính toán	40
3.1.2	Thông số đầu vào	40
3.1.3	Chia lưới mô hình.....	41
3.2	Giá trị ứng suất và các thông số cơ bản	42
3.3	Kết quả	43
3.3.1	Trường hợp 1: Thay đổi các giá trị của đường S-N Curves.....	44
3.3.2	Trường hợp 2: Thay đổi hệ số hình dạng Weibull	50
3.3.3	Trường hợp 3: Thay đổi số năm phục vụ (Year in service).....	53
3.3.4	Trường hợp 4: Hệ số tập trung ứng suất thay đổi	56
3.4	Đánh giá và phân tích	59
3.4.1	Trường hợp 1:.....	59
3.4.2	Trường hợp 2:.....	60
3.4.3	Trường hợp 3:.....	61
3.4.4	Trường hợp 4:.....	62
3.5	Kết luận chung	Error! Bookmark not defined.

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1 Đặc trưng cơ học của thép CT3 [8].....	5
Bảng 1.2 Kết quả tính toán khả năng tuổi thọ mỏi của kết cấu [7]	8
Bảng 2.1 Bảng tính cho hư hỏng mỏi với đường cong S-N bilinear [12]	20
Bảng 2.2 Đường cong S-N trong không khí theo DNVGL-RP-C203 (2016).....	23
Bảng 2.3 Hệ số giảm ứng suất tương ứng với hệ số sử dụng, η , cho đường cong C-W3 trong môi trường không khí.....	24
Bảng 2.4 Các hệ số sử dụng, η , dưới dạng một hàm số của tuổi thọ thiết kế và DFF (DNVGL-RP-C203 2016).	25
Bảng 2.5 Thiệt hại mỏi được tính toán để phân bố ứng suất dài hạn	30
Bảng 2.6 Bảng so sánh kết quả ví dụ 1	37
Bảng 2.7 Bảng so sánh kết quả ví dụ 1	38
Bảng 3.1 Bảng tổng hợp tính toán độ bền mỏi trường hợp 1 – 1	44
Bảng 3.2 Bảng tổng hợp tính toán độ bền mỏi trường hợp 1 – 2	47
Bảng 3.3 Bảng tổng hợp tính toán độ bền mỏi trường hợp 2	50
Bảng 3.4 Bảng tổng hợp tính toán độ bền mỏi trường hợp 3	53
Bảng 3.5 Bảng tổng hợp tính toán độ bền mỏi trường hợp 4	56

DANH MỤC HÌNH

Hình 1.1 Trường ứng suất dư do bị quá nhiệt [8].....	6
Hình 2.1 Phạm vi ứng suất cực đại cho phép trong 10^8 chu kỳ đối với các bộ phận trong không khí. (Theo DNVGL-RP-C203 2016).	24
Hình 2.2 Đóng góp điển hình vào hỏng hóc do mệt mỏi dọc theo đường cong S-N cho một cấu trúc nổi trên biển chịu tải sóng trong suốt 20 năm tuổi thọ dịch vụ.	27
Hình 2.3 Giao diện của chương trình tính toán	36
Hình 2.4 Kết quả xuất ra từ chương trình của điểm nóng ví dụ 1	37
Hình 2.5 Kết quả xuất ra từ chương trình của điểm nóng ví dụ 2	37
Hình 3.1 Góc khung sườn được nghiên cứu.....	40
Hình 3.2 Lực tác dụng vào khung sườn	41
Hình 3.3 Điều kiện biên áp dụng cho khung sườn	41
Hình 3.4 Mô hình chia lưới khung sườn.	42
Hình 3.5 Ứng suất lớn nhất	42
Hình 3.6: Bảng tính toán độ bền mỏi của kết cấu thân tàu.....	43
Hình 3.7 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của loại đường S-N curve đến thiệt hại mỏi do tính toán	59
Hình 3.8 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của loại đường S-N curve đến tuổi thọ tính toán	59
Hình 3.9 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của hệ số hình dạng Weibull đến thiệt hại mỏi do tính toán	60
Hình 3.10 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của hệ số hình dạng Weibull đến tuổi thọ tính toán	60
Hình 3.11 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của số năm phục vụ đến thiệt hại mỏi do tính toán	61
Hình 3.12 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của số năm phục vụ đến tuổi thọ tính toán ...	61
Hình 3.13 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của hệ số tập trung ứng suất đến thiệt hại mỏi do tính toán	62
Hình 3.14 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của hệ số tập trung ứng suất đến tuổi thọ tính toán	62

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Diễn giải tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
SRD	Stress Range Distribution	Phạm vi phân phối ứng suất
LDS	Laser Distance Sensor	Cảm biến khoảng cách Laser
3D	Three Dimension	Ba chiều
2D	Two Dimension	Hai chiều
LNG	Liquefied Natural Gas	Khí tự nhiên hóa lỏng
DNV	Det Norske Veritas	Một tổ chức đăng kiểm có trụ sở ở Na Uy.
DFF	Design Fatigue Factor	Hệ số thiết kế mỏi
SCF	Stress Concentration Factor	Hệ số tập trung ứng suất
SRD	Stress Range Distribution	Phạm vi phân phối ứng suất

PHẦN MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

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 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]. Khi đó, nếu sử dụng mô hình ứng suất đơn có thể dẫn đến sai số lớn khi tính toán tuổi thọ mỏi của kết cấu chịu trạng thái ứng suất phức tạp. Việc xác định và đánh giá các đặc trưng mỏi của chi tiết chịu ứng suất phức tạp đã được chú ý từ vài chục năm trở lại đây. Ngày nay, các phương pháp đánh giá tuổi thọ mỏi của chi tiết chịu ứng suất phức tạp có thể chia thành ba nhóm chính: phương pháp ứng suất - biến dạng tương đương [2], phương pháp năng lượng [3] và phương pháp mặt phẳng tới hạn [4-6]. Bên cạnh đó, chúng ta còn có thêm một phương pháp là phương pháp phạm vi phân phối ứng suất. [7]

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.

Bằng cách áp dụng phương pháp SRD, ta có thể dự đoán được vị trí nào trong kết cấu tàu có nguy cơ hư bị phá hủy cao hơn, từ đó đưa ra các biện pháp hạn chế và cải tiến trong thiết kế và vận hành tàu. Điều này giúp nâng cao độ an toàn và độ tin cậy của

tàu thủy và công trình nổi, tránh được các sự cố liên quan đến hỏng hóc mệt mỏi và giảm thiểu chi phí bảo trì và sửa chữa.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của nghiên cứu là cung cấp một phương pháp đáng tin cậy và dễ phân tích và đánh giá các yếu tố tác động đến độ bền mỏi của kết cấu tàu thủy và công trình nổi bằng phương pháp phạm vi phân phối ứng suất. Nghiên cứu nhằm xác định những yếu tố quan trọng tác động đến độ bền mỏi của kết cấu tàu trong các điều kiện khác nhau, từ đó đưa ra các dự đoán về độ mệt mỏi và tuổi thọ của kết cấu tàu. Mục tiêu cuối cùng là nâng cao độ an toàn, và hiệu quả trong thiết kế, vận hành và bảo trì của các kết cấu tàu thủy và công trình nổi.

Các mục tiêu cụ thể trong nghiên cứu bao gồm:

- Xác định, phân tích và đánh giá các yếu tố tác động đến độ bền mỏi của kết cấu tàu thủy và công trình nổi bằng phương pháp phạm vi phân phối ứng suất.
- Xây dựng một chương trình nhằm hỗ trợ việc tính toán các giá trị liên quan đến độ bền mỏi và xác định tuổi thọ của kết cấu tàu thủy và công trình nổi.

Câu hỏi đặt ra là: Những yếu tố nào tác động đến độ bền mỏi của kết cấu tàu thủy và công trình nổi trong quá trình hoạt động, và làm thế nào để áp dụng phương pháp phạm vi phân phối ứng suất để xác định, phân tích và đánh giá độ bền mỏi và tuổi thọ của kết cấu tàu trong các điều kiện khác nhau?

3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu trong đề tài chính là độ bền mỏi của kết cấu tàu thủy và công trình nổi.

Phạm vi nghiên cứu của đề tài bao gồm các nội dung sau:

- Phạm vi nội dung: trong nghiên cứu, luận văn tập trung vào vấn đề phân tích và đánh giá độ bền mỏi của kết cấu tàu thủy và công trình nổi.
- Phạm vi không gian: Luận văn thực hiện việc nghiên cứu này tại khu vực giao nhau giữa các kết cấu khỗ trong tàu thủy và công trình nổi.

- Phạm vi thời gian: Nghiên cứu được thực hiện trong 6 tháng (Từ tháng 11 năm 2023 đến tháng 4 năm 2024).

4. Phương pháp nghiên cứu

- Thống kê các nghiên cứu trước, mô phỏng để tính toán ứng suất lớn nhất và hệ số tập trung ứng suất, lập trình xây dựng công cụ ứng dụng thay thế tính toán thủ công.
- Sử dụng phương pháp phạm vi phân phối ứng suất, qua đó phân tích và đánh giá các yếu tố tác động đến độ bền mỏi kết cấu tàu thủy và công trình nổi.

5. Ý nghĩa của đề tài

Đề tài trên có ý nghĩa to lớn trong việc xác định độ bền mỏi của kết cấu tàu thủy và công trình nổi: Nghiên cứu này giúp xác định các yếu tố có thể ảnh hưởng đến độ bền mỏi của kết cấu tàu thủy và công trình nổi, giúp giảm thiểu nguy cơ sự cố kết cấu trên biển. Bên cạnh đó, chúng ta có thể xác định tuổi thọ của kết cấu, qua đó có xác định được thời gian sửa chữa, thay thế để đảm bảo an toàn hàng hải.

Ý nghĩa khoa học: Đề tài nhằm tóm tắt cơ sở lý thuyết về lĩnh vực đánh giá độ bền mỏi của kết cấu tàu thủy và công trình nổi. Kết quả đề tài là tạo ra một công cụ nhằm hỗ trợ trong lĩnh vực xác định độ bền mỏi kết cấu

Ý nghĩa thực tiễn: Có thể áp dụng tính toán về độ bền mỏi cho vào các kết cấu tàu thủy và công trình nổi khác nhau sau khi có kết quả độ tập trung ứng suất ứng suất.

6. Nội dung luận văn

Luận văn "**Nghiên cứu phương pháp đánh giá tổn thương mỏi tích lũy kết cấu, ứng dụng cho tàu thủy và công trình nổi.**" bao gồm các nội dung sau:

- Tổng quan về các kết quả nghiên cứu liên quan đến độ bền mỏi của các nhà khoa học trong và ngoài nước.
- Cơ sở lý thuyết về phương pháp phạm vi phân phối ứng suất.
- Xây dựng chương trình hỗ trợ tính toán.
- Mô phỏng mô hình kết cấu và xác định ứng suất.

- Sử dụng chương trình để đưa ra giá trị liên quan đến độ bền mỏi và tuổi thọ của kết cấu
- Đánh giá và phân tích kết quả về các yếu tố tác động đến độ bền mỏi của kết cấu.

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1 Tổng quan về nghiên cứu trong nước.

1.1.1 Xác định giới hạn bền mỏi bằng phương pháp số.

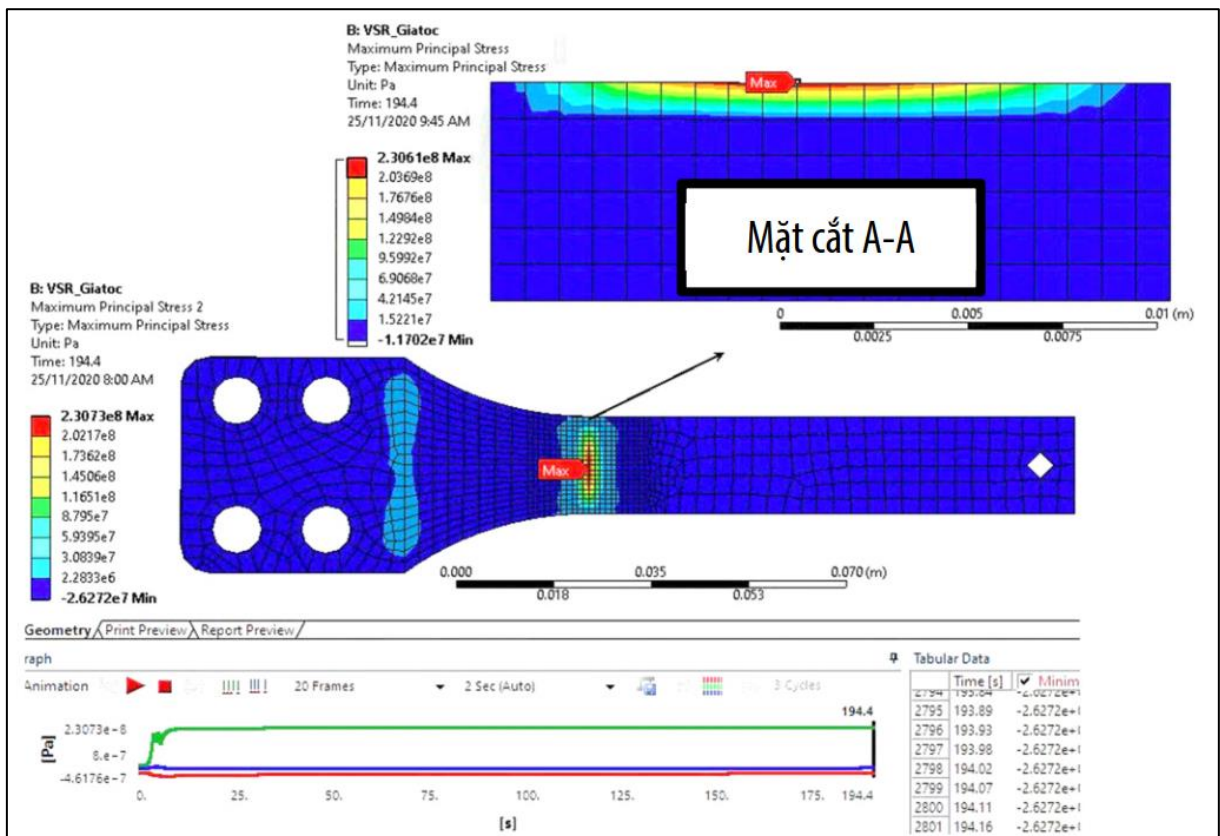
Nhóm tác giả: Đỗ Văn Sĩ, Bùi Mạnh Cường, Tạ Văn San trong nghiên cứu “Xác định giới hạn bền mỏi của chi tiết chịu ứng suất phức tạp bằng phương pháp số đã trình bày kết quả tính toán giới hạn bền mỏi của chi tiết chịu ứng suất phức tạp bằng phương pháp số. Trường ứng suất phức tạp được chuyển đổi thành 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.

Nội dung của tài liệu bao gồm việc chế tạo chi tiết từ thép CT3 có đặc trưng cơ học như bảng 1.1, sử dụng phương pháp cắt dây và gia nhiệt kiểu hàn để tạo ứng suất dư. Chi tiết được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn trên phần mềm ANSYS để đánh giá ứng suất dư và trường ứng suất khi bị uốn. Chi tiết chịu ứng suất dư do hàn và thường bị phá hủy do mỏi trong điều kiện tải trọng thay đổi. Xác suất phá hủy của chi tiết được xác định dựa trên công thức và mô hình phá hủy giòn. Các phương pháp đánh giá tuổi thọ mỏi của chi tiết chịu ứng suất phức tạp được trình bày, bao gồm ứng suất - biến dạng tương đương, năng lượng và mặt phẳng tới hạn. [8]

Bảng 1.1 Đặc trưng cơ học của thép CT3 [8]

Giới hạn bền	Giới hạn chảy	Modul đàn hồi	Hệ số poisson	Độ dẫn dài
440 Pa	296 Pa	200 Pa	0.3	20%

Kết quả cho thấy sự chênh lệch giữa sử dụng trường ứng suất đơn và trường ứng suất tương đương Von Mises. Khi chi tiết chịu ứng suất phức tạp, sử dụng ứng suất đơn có sự sai lệch lớn, trong khi ứng suất tương đương Von Mises giữ được độ chính xác cao. Phương pháp mặt phẳng tới hạn cho thấy kết quả chính xác, đặc biệt khi chi tiết chịu trường ứng suất phức tạp.



Hình 1.1 Trường ứng suất dư do bị quá nhiệt [8]

Bài nghiên cứu nhấn mạnh rằng sử dụng phương pháp số để tính giới hạn bền mỏi cho chi tiết chịu ứng suất phức tạp mang lại lợi ích lớn hơn so với các phương pháp khác. Phương pháp mặt phẳng tới hạn được đánh giá là phù hợp và chính xác trong việc phản ánh quá trình phá hủy mỏi trong thực tế. Kết quả của nghiên cứu có thể áp dụng để tiến hành tính toán sơ bộ và định hướng cho thực nghiệm, đồng thời đưa ra những nhận định quan trọng về phương pháp đánh giá giới hạn bền mỏi của chi tiết chịu ứng suất phức tạp. Do đó kết luận phương pháp phần tử hữu hạn có thể được sử dụng để tính toán giới hạn bền mỏi của chi tiết. [8]

1.1.2 Nghiên cứu tính toán độ bền mỏi kết cấu thép.

Bài nghiên cứu “**Nghiên cứu tính toán độ bền mỏi kết cấu thép cửa van phẳng kéo đứng nhịp uốn**” của các tác giả Trần Xuân Hải và Vũ Hoàng Trung tập trung vào việc nghiên cứu và tính toán độ bền mỏi cho cấu trúc cửa van phẳng kéo đứng nhịp lớn làm việc hai chiều vì lý do cấu trúc cửa van này được làm từ thép và liên kết bằng hàn trong xưởng và cả ở ngoài hiện trường. Vấn đề được đề cập trong bài báo là khả năng phá hoại mỏi của cửa van do sự tồn tại một số khuyết tật tại vị trí nguy hiểm, đặc biệt là

tại các đường hàn, dẫn đến việc tập trung ứng suất và giảm độ bền của cấu trúc gây ra sự phá hủy.

Việc tính toán độ bền mỏi cho cửa van là rất quan trọng để đảm bảo an toàn và hiệu suất hoạt động của kết cấu. Bài báo sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn với phần mềm hỗ trợ là Ansys để xác định vị trí nguy hiểm của các nút giàn và nghiên cứu độ bền mỏi tại một số vị trí đại diện để có cơ sở cho việc tính toán độ bền mỏi toàn bộ cửa van.

Thông qua việc phân tích tính toán, bài báo chỉ ra rằng cấu trúc cửa van phẳng kéo đứng nhịp lớn có thể bị phá hoại mỏi ngay cả khi có sự thay đổi nhỏ về ứng suất. Điều này đặt ra một vấn đề nghiêm trọng về an toàn và yêu cầu sự chú ý đặc biệt đối với tính toán độ bền mỏi của cấu trúc này đồng thời qua đó nhấn mạnh về tầm quan trọng của việc xem xét đầy đủ cho tất cả các nút giàn và tính toán mỏi cho từng nút giàn, đặc biệt là khi xem xét chất lượng đường hàn có khuyết tật. Việc này giúp đánh giá an toàn của cửa van và đưa ra các giải pháp cải thiện nếu cần thiết.

Trong quá trình tính toán kết cấu cửa van, đặc biệt là khi cửa van hoạt động hai chiều để điều chỉnh lưu lượng nước trong khu vực cửa sông, áp lực nước thường xuyên biến đổi không ngừng về cường độ và hướng, gây ra ứng suất biến đổi trong các thành phần của cửa van. Đặc biệt, những sự biến đổi này đặt ra những thách thức đặc biệt đối với các kết nối hàn giữa các thanh giàn. Trong khi chu kỳ biến đổi ứng suất không lớn, cửa van có thể vẫn bị hỏng mỏi nếu có khuyết tật tại các đường hàn trên hiện trường.

Việc tính toán độ bền mỏi cho cửa van thép phẳng, đặc biệt là khi chịu tải trọng đứng nhịp lớn, là một yếu tố quan trọng cần được chú ý và nghiên cứu kỹ lưỡng. Kết quả tính toán độ bền mỏi tại một nút liên kết chân giàn chính với dầm biên của cửa van phẳng nhịp lớn cho thấy rằng không có hỏng mỏi xảy ra sau khi thực hiện chu trình lặp lại tải trọng lên đến $1,001 \times 10^5$ lần. Mặc dù vị trí chân giàn dưới có thể coi là vị trí nguy hiểm nhất của cửa van, nhưng để đảm bảo an toàn toàn diện, cần phải thực hiện xem xét chi tiết cho tất cả các nút giàn và kiểm tra tính toán mỏi cho những nút này, đặc biệt là đối với chất lượng của đường hàn và khả năng xuất hiện khuyết tật trong chúng.

Tóm lại, bài báo này cung cấp cái nhìn sâu sắc về quá trình tính toán độ bền mỏi cho cấu trúc cửa van phẳng kéo đứng nhịp lớn và nhấn mạnh về tầm quan trọng của việc đảm bảo an toàn và hiệu suất hoạt động của cấu trúc trong điều kiện làm việc hai chiều.

1.1.3 Nghiên cứu về vấn đề tăng tuổi thọ kết cấu

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 mỗi của kết cấu. Mô hình tích lũy tổn thương mỗi tuyến tính theo phương pháp của Miner được áp dụng với ứng suất dư đóng vai trò quan trọng.

Bài báo sử dụng các thí nghiệm trên máy kéo-nén vạn năng MTS-810 Landmark đã giúp xác định đặc tính cơ học của vật liệu mẫu, bao gồm giới hạn chảy, giới hạn bền, và mô đun đàn hồi. Đo ứng suất dư sau gia nhiệt được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của công nghệ rung khử ứng suất dư. Kết quả chỉ ra giá trị trung bình của ứng suất dư thu được từ các lần đo khác nhau, tạo nền tảng cho phân tích chi tiết. Tiếp theo, thí nghiệm tìm tuổi thọ mỗi trước và sau khi áp dụng rung khử ứng suất dư trên bàn rung với hệ thống điều khiển LDS. Kết quả cho thấy mức tăng tuổi thọ mỗi trung bình của các mẫu sau khi sử dụng công nghệ rung khử ứng suất dư là khoảng 2,45 lần so với trước khi áp dụng công nghệ này. Đồng thời, bài báo sử dụng các lý thuyết khác nhau để tính toán mức tăng tuổi thọ mỗi.

Dựa vào kết quả thí nghiệm và tính toán, bài báo đề xuất lý thuyết Goodman (sai khác 9%) và công thức Gerber (sai khác 53%) là 2 lý thuyết có kết quả sát với thực nghiệm nhất. [7]

Bảng 1.2 Kết quả tính toán khả năng tuổi thọ mỗi của kết cấu [7]

STT	Sử dụng lý thuyết của tác giả	Mức tăng tuổi thọ mỗi của chi tiết	Sai khác so với kết quả thí nghiệm
1	Gerber	1.15	-53%
2	Goodman	2.67	+9%
3	Peterxon	0.43	-82%
4	Stenov	67.95	+273%

5	Smith	0.53	-78%
6	Thí nghiệm của bài báo	2.45	

1.2 Tổng quan về các nghiên cứu nước ngoài.

1.2.1 Tiếp cận phương pháp sử dụng đường cong S-N để đánh giá độ bền mỏi.

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.

Hai loại kết cấu tàu đã được chọn để thử nghiệm quy mô đầy đủ. Loại đầu tiên là các vị trí giao điểm giữa các khung web, phổ biến trong tàu roll-on/roll-off (ro/ro). Ba mô hình đã được thử nghiệm dưới tải trọng biên độ không đổi. Loại thứ hai là các giao điểm giữa dầm dọc và khung sườn, đã xuất hiện các hỏng hóc do độ bền mỏi gần đây trên tàu chở container. Năm mô hình đã được thử nghiệm, ba dưới tải trọng biên độ không đổi và hai dưới tải trọng biên độ biến đổi.

Tất cả các thử nghiệm đã cho thấy giai đoạn lan truyền vết nứt tương đối dài sau khi xuất hiện các vết nứt đầu tiên. Đối với phân tích bằng phương pháp số, đã sử dụng cả phương pháp ứng suất điểm nóng kết cấu và phương pháp ứng suất rãnh hiệu quả. Phương pháp ứng suất rãnh hiệu quả cho phép xem xét hình dạng hàn, điều này có thể giải thích một phần sự khác biệt trong vấn đề hỏng hóc được quan sát và tính toán.

Từ các kết quả của các nghiên cứu thử nghiệm, đã đạt được cái nhìn tổng quát về cường độ của các cấu trúc tàu hàn phức tạp. Các nghiên cứu này đóng góp quan trọng cho việc cải thiện phương pháp thiết kế và xây dựng các kết cấu tàu an toàn và đáng tin cậy hơn. [9]

Các chi tiết cấu trúc của tàu thường dễ ứng suất mỗi do các tải động, thường là do biến cả, và do các vết nứt ở các đường nối hàn. Hai chi tiết điển hình đã được nghiên cứu thông qua các thử nghiệm thực tế và phân tích số trong một chương trình nghiên cứu chung để xác minh các phương pháp đánh giá ứng suất mỗi. Dưới đây là những kết luận được đưa ra từ những nghiên cứu:

- Sự bắt đầu của những vết nứt đầu tiên trong các thử nghiệm được theo sau bởi một giai đoạn lan rộng vết nứt dài cho đến khi cấu trúc trở nên suy yếu đáng kể. Một tiêu chí hỏng hại hợp lý, tương ứng với vết nứt có độ dài 20 mm, tức là độ dày của mép hoặc tùy chọn khác là chiều rộng của đường hàn ở đầu nối được xem xét.
- Ứng dụng phương pháp số về ứng suất tại các điểm nóng của cấu trúc đòi hỏi xem xét đặc biệt trong một số trường hợp, như là các đỉnh kèm trên phần mở của thép mở.
- Việc tính toán ứng suất rãnh hiệu quả trong các cấu trúc lớn có thể thực hiện được với sự giúp đỡ của kỹ thuật mô hình, đòi hỏi nhiều nỗ lực hơn so với các kỹ thuật khác. Tuy nhiên, nó cho phép xem xét các ảnh hưởng của mối hàn cục bộ ở các kết cấu và chân đường hàn tăng lên.
- Đánh giá ứng suất với các phương pháp khác nhau, bao gồm quy tắc Palmgren–Miner cho tải biến đổi độ lớn, mang lại kết quả tích cực.
- Sự biến dạng của cấu trúc phức tạp xác định trong các phân tích số có thể khác biệt so với sự biến dạng thực tế do ứng suất biến đổi.

1.2.2 *Đánh giá độ bền mỏi của tàu Container rất lớn*

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 mỗi 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 - cầu 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 mỗi được ước tính trực tiếp bằng cách sử dụng hàm chuyển đổi ứng suất với phản ứng co giãn tuyến tính.

Nghiên cứu này nhằm thiết lập một quy trình để đánh giá độ bền mỗi dựa trên một kỹ thuật phân tích thống kê tuyến tính được sử dụng rộng rãi trong đánh giá độ bền mỗi. Do đó, phản ứng rung lắc của các tàu chở hàng rất lớn đã được xem xét, quy trình đã được áp dụng cho một tàu thực tế và tính khả dụng của nó đã được đánh giá. Đầu tiên, thiết lập một phương pháp ngẫu nhiên dựa trên hiệu ứng đàn hồi để tính toán trực tiếp tổn thương độ bền mỗi tại các vị trí nóng bằng cách sử dụng mô hình 3D. Bên cạnh đó, phương pháp này cũng đã được sử dụng để ước lượng tổn thương mỗi của góc nắp hầm hàng theo hướng dọc của tàu chở hàng container. Để đánh giá tính khả dụng của phương pháp này, kết quả và đặc tính của tổn thương mỗi được tính từ mỗi phương pháp đã được phân tích. Tuy nhiên, nghiên cứu cũng gặp một số hạn chế khi áp dụng và đánh giá phương pháp đề xuất trong thiết kế tàu thực tế. Trong tương lai, cần nghiên cứu kỹ hơn về hàm chuyển đổi ứng suất và phản ứng ứng suất được sử dụng để tính toán phá hủy mỗi, và tiến hành các nghiên cứu liên quan đến các yếu tố phi tuyến. [10]

1.2.3 Đánh giá độ bền mỗi của hệ thống chứa hàng LNG

Bài nghiên cứu: “Fatigue strength assessment of MARK-III type LNG cargo containment system” của các tác giả Myung Hyun Kim, Sang Min Lee, Jae Myung Lee, Byung Jae Noh, và Wha Soo Kim tập trung vào việc khám phá độ bền mệt mỏi của hệ thống cách nhiệt loại Mark-III trên tàu chở LNG. Các thử nghiệm mệt mỏi đã được tiến hành ở ba vị trí khác nhau trên hệ thống cách nhiệt, đồng thời xem xét tác động từ việc chuyển động dội sóng. Các mức tải trọng đã được xác định dựa trên độ bền cuối cùng của bọt xốp polyurethane gia cường.

Tổng cộng có 28 mẫu thử thuộc 3 loại khác nhau được sử dụng trong các thử nghiệm mệt mỏi. Nghiên cứu đã tìm hiểu tuổi thọ mệt mỏi cũng như các đặc điểm hỏng hóc của hệ thống cách nhiệt LNG. Trong quá trình thử nghiệm, quan sát được các hỏng hóc điển hình của băng cách nhiệt Mark-III, bao gồm các nứt và các hiện tượng tách lớp trong các lớp composite khác nhau.

Nghiên cứu đề xuất một hướng dẫn thiết kế độ bền mỏi dựa trên kỹ thuật phân tích phần tử hữu hạn để đánh giá độ mỏi nhất quán cho hệ thống cách nhiệt LNGC. Điều này bao gồm việc sử dụng dải mastic hình chữ nhật để đạt được kết quả đáng tin cậy và nhất quán trong việc thiết kế mệt mỏi.

Đường cong S-N thiết kế được đề xuất dựa trên kết quả của các thử nghiệm phân tích phần tử hữu hạn. Kết quả này có thể được sử dụng trong việc phân tích độ bền mỏi cho hệ thống cách nhiệt LNG, giúp nâng cao hiệu quả và đáng tin cậy trong thiết kế của hệ thống cách nhiệt này. [11]

1.3 Tổng kết

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.
- **Nghiên cứu về hệ thống cách nhiệt LNG:** Nghiên cứu này đặt ra thách thức về tính khả dụng của phương pháp đánh giá độ bền mỏi, đặc biệt là khi xem xét hàm chuyển đổi ứng suất và phản ứng ứng suất được sử dụng để tính toán phá hủy mỏi.

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,... 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.

CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ LUẬN

2.1 Cơ sở lý thuyết của phương pháp phạm vi phân phối ứng suất

2.1.1 Phân bố Weibull và phạm vi ứng suất dài hạn

Đối với việc đánh giá độ bền mỏi của các cấu trúc nổi, thường được giả định rằng phân bố biên độ căng kéo dài hạn có thể được đại diện một cách đủ đặc lực bằng phân phối Weibull hai tham số (xem ví dụ, Guedes Soares và Moan 1991). Hàm mật độ xác suất cho phân phối Weibull hai tham số có dạng:

$$f(\Delta\sigma) = \frac{h}{q} \left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^{h-1} e^{-\left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^h} \quad (2.1)$$

Trong đó:

- h là tham số hình dáng
- q là tham số tỷ lệ

Tham số tỷ lệ liên quan đến biên độ ứng suất tối đa $\Delta\sigma$, trong suốt n_0 chu kỳ ứng suất, cụ thể như sau:

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{1/h}} \quad (2.2)$$

Phân phối tích lũy sau đây cho biên độ ứng suất được tạo ra bằng việc tích phân của phương trình (2.1) từ 0 đến $\Delta\sigma$:

$$\begin{aligned} F(\Delta\sigma) &= \int_0^{\Delta\sigma} f(\Delta\sigma) d\Delta\sigma \\ &= \int_0^{\Delta\sigma} \frac{h}{q} \left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^{h-1} e^{-\left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^h} d\Delta\sigma \\ &= \left| -e^{-\left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^h} \right|_0^{\Delta\sigma} \\ &= 1 - e^{-\left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^h} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Với mục đích kỹ thuật, tham số tỷ lệ q có thể loại bỏ bằng cách giới thiệu biên độ ứng suất tối đa σ_0 trong suốt n_0 chu kỳ ứng suất. Điều này có thể thực hiện bằng cách sử dụng hàm bù, Q , biểu thị xác suất biên độ ứng suất $\Delta\sigma$ vượt quá:

$$Q(\Delta\sigma) = 1 - F(\Delta\sigma) \quad (2.4)$$

Biên độ ứng suất lớn nhất xảy ra chỉ một lần trong suốt n_0 chu kỳ, và xác suất xảy ra điều này là:

$$Q(\Delta\sigma_0) = \frac{1}{n_0} = e^{-\left(\frac{\Delta\sigma_0}{q}\right)^h} \quad (2.5)$$

Số lượng chu kỳ, n , mà biên độ ứng suất $\Delta\sigma$ bị vượt quá sau đó có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$Q(\Delta\sigma) = \frac{n}{n_0} = e^{-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h} \quad (2.6)$$

Lấy logarithm cả hai phía của phương trình (2.6) ta có kết quả là:

$$\ln \frac{n}{n_0} = -\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h \quad (2.7)$$

Sau đó, bằng cách thay q từ phương trình (2.2) vào, phương trình trở thành:

$$\ln \frac{n}{n_0} = \ln n - \ln n_0 = -\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0}\right) \ln n_0 \quad (2.8)$$

Và ta có:

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0} = \left(1 - \frac{\ln n}{\ln n_0}\right)^{1/h} = \left(1 - \frac{\log n}{\log n_0}\right)^{1/h} \quad (2.9)$$

Ở phần cuối của phương trình này, mối quan hệ $\log n = \ln n$ được sử dụng. [12]

2.1.2 Các biểu thức cho sự phá hủy mỏi dựa trên phân phối Weibull của biên độ ứng suất.

Hàm gamma (xem, ví dụ, Abramowitz và Stegun 1970) được định nghĩa như sau:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt \quad (2.10)$$

Hàm gamma không hoàn chỉnh được định nghĩa như sau:

$$\gamma(a, x) = \int_0^x e^{-t} t^{a-1} dt \quad (2.11)$$

(a trong biểu thức này là một tham số khác biệt so với tham số được sử dụng để mô tả đường cong S-N.)

Hàm bù gamma không hoàn chỉnh được định nghĩa như sau:

$$\Gamma(a, x) = \Gamma(a) - \gamma(a, x) = \int_x^\infty e^{-t} t^{a-1} dt \quad (2.12)$$

Phân phối Weibull hai tham số được trình bày trong phương trình (2.1). Đối với đường cong S-N một độ dốc, tổn thương mỗi có thể tính dựa trên việc tích phân của phương trình tổn thương Palmgren-Miner và đường cong S-N, cụ thể như sau:

$$\begin{aligned} D &= \int_0^\infty \frac{dn}{N(\Delta\sigma)} d\Delta\sigma \\ &= n_0 \int_0^\infty \frac{f(\Delta\sigma)}{N(\Delta\sigma)} d\Delta\sigma \\ &= \frac{n_0}{a_d} \int_0^\infty \Delta\sigma^m \frac{h}{q} \left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^{h-1} e^{-\left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^h} d\Delta\sigma \end{aligned} \quad (2.13)$$

Tiếp theo ta có:

$$t = \left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^h \quad (2.14)$$

Lấy vi phân của phương trình 2.14, ta có:

$$\frac{dt}{d\Delta\sigma} = \frac{h}{q} \left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^{h-1} \quad (2.15)$$

Sau đó, bằng cách kết hợp các phương trình (2.13), (2.14) và (2.15), biểu thức sau dành cho sự phá hủy mỗi được tính toán được tạo ra (để so sánh với phương trình 2.10):

$$D = \frac{n_0}{a_d} q^m \int_0^\infty e^{-t} t^{\left(1+\frac{m}{h}\right)-1} dt \quad (2.16)$$

Bằng cách so sánh phương trình (2.16) và (2.10), có thể thấy rằng sự phá hủy mỏi có thể được tính toán từ biểu thức sau đây:

$$D = \frac{n_0}{a_d} q^m \Gamma \left(1 + \frac{m}{h} \right) \quad (2.17)$$

Với q từ công thức 2.2, sự phá hủy mỏi có thể được tính như sau:

$$D = \frac{n_0}{a_d} \frac{\Delta \sigma_0^m}{(\ln n_0)^{m/h}} \Gamma \left(1 + \frac{m}{h} \right) \quad (2.18)$$

Để tính toán sự phát triển của vết nứt bằng cơ học gãy vỡ khi bỏ qua các giá trị ngưỡng, có thể thuận tiện để tạo ra một biên độ ứng suất tĩnh tương đương mà cung cấp cùng sự phá hủy mỏi tính toán như từ một phân phối biên độ ứng suất dài hạn theo phân phối Weibull cho cùng số chu kỳ ứng suất. Điều này có thể được đạt được bằng cách yêu cầu rằng sự phá hủy mỏi dưới tải trọng biên độ tĩnh, xem xét một khối với chu kỳ n_0 đem lại cùng sự phá hủy mỏi như bằng phương trình (2.17):

$$D = \frac{n_0}{a_d} \Delta \sigma_{eq}^m = \frac{n_0}{a_d} \frac{\Delta \sigma_0^m}{(\ln n_0)^{m/h}} \Gamma \left(1 + \frac{m}{h} \right) \quad (2.19)$$

Giải phương trình này để tìm hằng số biên độ ứng suất tĩnh tương đương ta có:

$$\Delta \sigma_{eq} = \frac{\Delta \sigma_0}{(\ln n_0)^{1/h}} \sqrt[m]{\Gamma \left(1 + \frac{m}{h} \right)} \quad (2.20)$$

Với q từ phương trình 2.2, phương trình trên cũng có thể được trình bày như sau:

$$\Delta \sigma_{eq} = q \sqrt[m]{\Gamma \left(1 + \frac{m}{h} \right)} \quad (2.21)$$

Đối với đường cong S-N hai độ dốc (bilinear), sự phá hủy mỏi cũng có thể được tính toán theo quy tắc Palmgren-Miner bằng cách tích phân chúng dưới mỗi phần của các đường cong S-N bilinear. Số lượng chu kỳ trong phần tử số của quy tắc phá hủy được tạo ra từ biểu thức cho phân phối biên độ ứng suất dài hạn theo phân phối Weibull. Do đó, sự phá hủy mỏi được tính toán như sau:

$$D = \frac{n_0}{a_{d1}} \int_{S_1}^{\infty} \Delta \sigma^{m_1} \frac{h}{q} \left(\frac{\Delta \sigma}{q} \right)^{h-1} e^{-\left(\frac{\Delta \sigma}{q} \right)^h} d\Delta \sigma + \frac{n_0}{a_{d2}} \int_{S_2}^{\infty} \Delta \sigma^{m_2} \frac{h}{q} \left(\frac{\Delta \sigma}{q} \right)^{h-1} e^{-\left(\frac{\Delta \sigma}{q} \right)^h} d\Delta \sigma \quad (2.22)$$

Kết hợp với phương trình 2.14 và 2.15, chúng ta có:

$$D = \frac{n_0}{a_{d1}} \int_{(S_1/q)^h}^{\infty} q^{m_1} t^{\frac{m_1}{h}} \frac{dt}{d\Delta \sigma} e^{-t} d\Delta \sigma + \frac{n_0}{a_{d2}} \int_0^{(S_1/q)^h} q^{m_2} t^{\frac{m_2}{h}} \frac{dt}{d\Delta \sigma} e^{-t} d\Delta \sigma \quad (2.23)$$

$$= \frac{n_0}{a_{d1}} q^{m_1} \int_{(S_1/q)^h}^{\infty} e^{-t} t^{\left(1+\frac{m_1}{h}\right)-1} dt + \frac{n_0}{a_{d2}} q^{m_2} \int_0^{(S_1/q)^h} e^{-t} t^{\left(1+\frac{m_2}{h}\right)-1} dt$$

trong đó S_1 là ứng suất tại điểm chuyển từ phần trái sang phần phải của đường cong S-N. So sánh biểu thức này cho sự phá hủy mỗi với định nghĩa của các hàm gamma không hoàn chỉnh trong các phương trình (2.11) và (2.12), ta có thể tạo ra phương trình sau đây [12]:

$$D = \frac{n_0}{a_{d1}} q^{m_1} \Gamma \left(1 + \frac{m_1}{h}; \left(\frac{S_1}{q} \right)^h \right) + \frac{n_0}{a_{d2}} q^{m_2} \Gamma \left(1 + \frac{m_2}{h}; \left(\frac{S_2}{q} \right)^h \right) \quad (2.24)$$

2.1.3 Biểu thức cho sự phá hủy mỗi dựa trên phân phối Rayleigh của biên độ ứng suất.

Phân phối Rayleigh thường được sử dụng để tính toán sự phá hủy mỗi trong một trạng thái biến khi thực hiện phân tích mỗi dựa trên phản ứng tần số. Phân phối Rayleigh có dạng như sau:

$$f(\Delta \sigma) = \frac{\Delta \sigma}{4\sigma_x^2} e^{-\frac{\Delta \sigma^2}{8\sigma_x^2}} \quad (2.25)$$

Trong đó:

- $\Delta \sigma$ = biên độ ứng suất
- σ_x = độ lệch chuẩn

So sánh các phân phối, có thể quan sát rằng phân phối Rayleigh là một trường hợp đặc biệt của phân phối Weibull, với:

$$\begin{aligned} h &= 2 \\ q &= 2\sqrt{2}\sigma_x \end{aligned} \quad (2.26)$$

Do đó, biểu thức tính toán sự phá hủy mỏi có thể được tính toán trực tiếp từ phương trình 2.24 như sau [12]:

$$\begin{aligned} D &= \frac{n_0}{a_{d1}} (2\sqrt{2}\sigma_x)^{m_1} \Gamma \left(1 + \frac{m_1}{2}; \left(\frac{S_1}{2\sqrt{2}\sigma_x} \right)^h \right) \\ &+ \frac{n_0}{a_{d2}} (2\sqrt{2}\sigma_x)^{m_2} \gamma \left(1 + \frac{m_2}{2}; \left(\frac{S_1}{2\sqrt{2}\sigma_x} \right)^h \right) \end{aligned} \quad (2.27)$$

2.1.4 Ví dụ về việc sử dụng biểu thức cho mỏi trong các bảng tính toán dựa trên đường cong S-N Bilinear.

Trong ví dụ dưới đây, sẽ được trình bày cách sử dụng các biểu thức tương ứng với sự phá hủy mỏi dựa trên đường cong S-N Bilinear trong một bảng tính toán thực tế. Hàm gamma có thể được tính trực tiếp từ một hàm có sẵn trong bảng tính toán. Trong một bảng tính hàm được viết bằng ngôn ngữ C#, chúng ta có thể tính được giá trị $\Gamma(a)$

Phân phối gamma có thể được sử dụng để tính các hàm gamma không hoàn chỉnh trong phương trình (2.24). Hàm này được định nghĩa như sau:

$$P(a, x) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^x e^{-t} t^{a-1} dt \quad a > 0 \quad (2.28)$$

và:

$$\gamma(a, x) = P(a, x) \Gamma(a) = \int_0^x e^{-t} t^{a-1} dt \quad a > 0 \quad (2.29)$$

Hàm bù gamma không hoàn chỉnh được tạo ra như sau:

$$\Gamma(a, x) = \Gamma(a) - \gamma(a, x) = \int_x^\infty e^{-t} t^{a-1} dt \quad (2.30)$$

Ta thấy:

$$x = \left(\frac{S_1}{q} \right)^h \quad (2.31)$$

$$a = 1 + \frac{m_1}{h} \text{ cho phần bên trái đường S-N}$$

$$a = 1 + \frac{m_2}{h} \text{ cho phần bên phải đường S-N}$$

Bảng 2.1 Bảng tính cho hư hỏng mỏi với đường cong S-N bilinear [12]

STT		D	E	Ghi chú
1	STT điểm nóng kết cấu	1	2	
2	Đường cong S-N	B2	F1	
3	Phạm vi ứng suất danh nghĩa (MPa)	131.61	136.75	
4	Hệ số tập trung ứng suất	3	1.15	
5	Hệ số Weibull: h	1.1	1.1	
6	Chu kỳ tại vị trí khớp của đường cong S-N (N1)	1e7	1e7	
7	$m_1 (N \leq N_1 \text{ cycles})$	4	3	
8	$\log a_{d1} (N \leq N_1 \text{ cycles})$	14.885	11.699	
9	$m_2 (N > N_1 \text{ cycles})$	5	5	
10	$\log a_{d2} (N > N_1 \text{ cycles})$	16.856	14.832	
11	Thời gian phục vụ (năm)	20	20	
12	Tần số: ν_0	0.159	0.159	
13	Độ dày hiệu quả [mm]	30	30	
14	Độ dày tham khảo	25	25	
15	Số mũ độ dày: k	0	0.25	
16	$T_d =$ Thời gian phục vụ (năm).60.60.24.365	6.31e8	6.31e8	
17	Số chu kỳ được tính toán: n_0	1e8	1e8	
18	Hệ số tỉ lệ Weibull được tính toán: q	27.932	11.126	
19	Độ dày hoặc kích thước được chỉnh sửa	1	1.047	
20	$\text{Gamma}(1+m_1/h)$	14.089	4.306	
21	$\text{Gamma}(1+m_2/h)$	56.331	56.331	

22	Ứng suất tại vị trí khớp của đường cong S-N: S_1	93.594	36.841	
23	$(S_1 / q)^h$	3.781	3.733	
24	Phân phối Gamma $P\left((1 + m_1 / h), (S_1 / q)^h\right)$	0.395	0.57	
25	Phân phối gamma $P\left((1 + m_2 / h), (S_1 / q)^h\right)$	0.242	0.233	
26	Thiệt hại mỗi do tính toán: D	1	1	
27	Tuổi thọ được tính toán T [years]	20.006	20.002	

2.1.5 Xác suất bị vượt quá

Khái niệm về mức xác suất được sử dụng trong thiết kế cấu trúc tàu. Nó cũng được sử dụng trong phân tích mệt mỏi liên quan đến việc tính toán tải trọng áp lực bên cạnh trên các tàu sản xuất nổi (DNV-RP-C206 2012). Ký hiệu này có ý nghĩa khác biệt so với xác suất sự cố hàng năm. Ký hiệu về mức xác suất hoặc xác suất bị vượt quá được sử dụng với tham chiếu đến một mô tả Weibull về phân phối dài hạn của phạm vi ứng suất hoặc chiều cao sóng. Mức xác suất được sử dụng ở đây được định nghĩa là xác suất một giá trị bị vượt quá. Ví dụ, nếu có $n_0 = 10^8$ chu kỳ tải trọng trong 20 năm, xác suất rằng chiều cao sóng tối đa hoặc một tải trọng bị vượt quá trong những chu kỳ tải trọng này trong 20 năm là $1 / n_0 = 10^{-8}$. Do đó, có thể thấy rằng điều này khá khác biệt so với xác suất hàng năm, một biểu thức được sử dụng thường xuyên hơn trong việc đánh giá mức độ an toàn của kết cấu hàng hải. Giả định rằng phân phối chiều cao sóng dài hạn có một phân phối Weibull, một phương trình tương tự cho mối quan hệ giữa chiều cao sóng và xác suất bị vượt quá, tương tự như phạm vi ứng suất trong phương trình (2.9), có thể được tìm ra như sau:

$$H = H_{\max} \left(1 - \frac{\log n}{\log n_0} \right)^{1/h} \quad (2.32)$$

Một mức xác suất được đề cập trong DNV CN 30.7 (2014), "Fatigue Assessment of Ship Structures" là 10^{-4} điều này có nghĩa rằng chiều cao sóng tương ứng với mức xác suất này cho một tham số hình dạng Weibull là 1.0 là:

$$H = H_{\max} \left(1 - \frac{\log 10^4}{\log 10^8} \right)^{1/h} = \frac{1}{2} H_{\max} \quad (2.33)$$

trong đó H_{\max} là chiều cao sóng tối đa trong suốt 20 năm.

Do đó, từ phương trình này có thể thấy rằng một mức xác suất là 10^{-4} tương ứng với một nửa chiều cao sóng tối đa trong suốt 20 năm, với một tham số hình dạng Weibull, $h=1.0$. Như vậy, chiều cao sóng này sẽ bị vượt quá 10.000 lần trong khoảng thời gian 20 năm. Tham số hình dạng cho phân phối phạm vi ứng suất có thể khác biệt so với tham số cho chiều cao sóng, tùy thuộc vào mối quan hệ giữa chiều cao sóng và tải trọng trên cấu trúc cũng như khả năng phản ứng động của cấu trúc.

Phương trình (2.2) có thể được sử dụng trực tiếp để tính toán dây căng thẳng tại các mức xác suất khác nhau, vì tham số tỷ lệ là một giá trị đã cho trong một phân phối Weibull cụ thể. Như vậy, mối quan hệ giữa hai mức xác suất khác nhau có thể được thể hiện như sau:

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{1/h}} = \frac{\Delta\sigma}{(\ln n)^{1/h}} \quad (2.34)$$

Điều này cho ra:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_0 \left(\frac{\ln n}{\ln n_0} \right)^{1/h} = \Delta\sigma_0 \left(\frac{\log n}{\log n_0} \right)^{1/h} \quad (2.35)$$

Phương trình này là cách thực tế để chuyển đổi phạm vi ứng suất giữa các mức xác suất khác nhau. Do đó, xem xét ví dụ về một cấu trúc ngoại biên chịu tải trọng sóng trong suốt 20 năm, số chu kỳ thường là 10^8 . Phạm vi ứng suất lớn nhất trong suốt 20 năm có thể được ký hiệu là $\Delta\sigma_{20}$. Số chu kỳ tương ứng trong suốt 100 năm là $5 \cdot 10^8$. Phạm vi ứng suất lớn nhất trong suốt 100 năm có thể được ký hiệu là $\Delta\sigma_{100}$. Phương trình (2.35) có thể được sử dụng để thiết lập mối quan hệ giữa hai phạm vi ứng suất này.

$$\Delta\sigma_{20} = \Delta\sigma_{100} \left(\frac{\log n_{20}}{\log n_{100}} \right)^{1/h} = \Delta\sigma_{100} \left(\frac{\log 10^8}{\log 5 \cdot 10^8} \right)^{1/h} = \Delta\sigma_{100} (0.92)^{1/h} \quad (2.36)$$

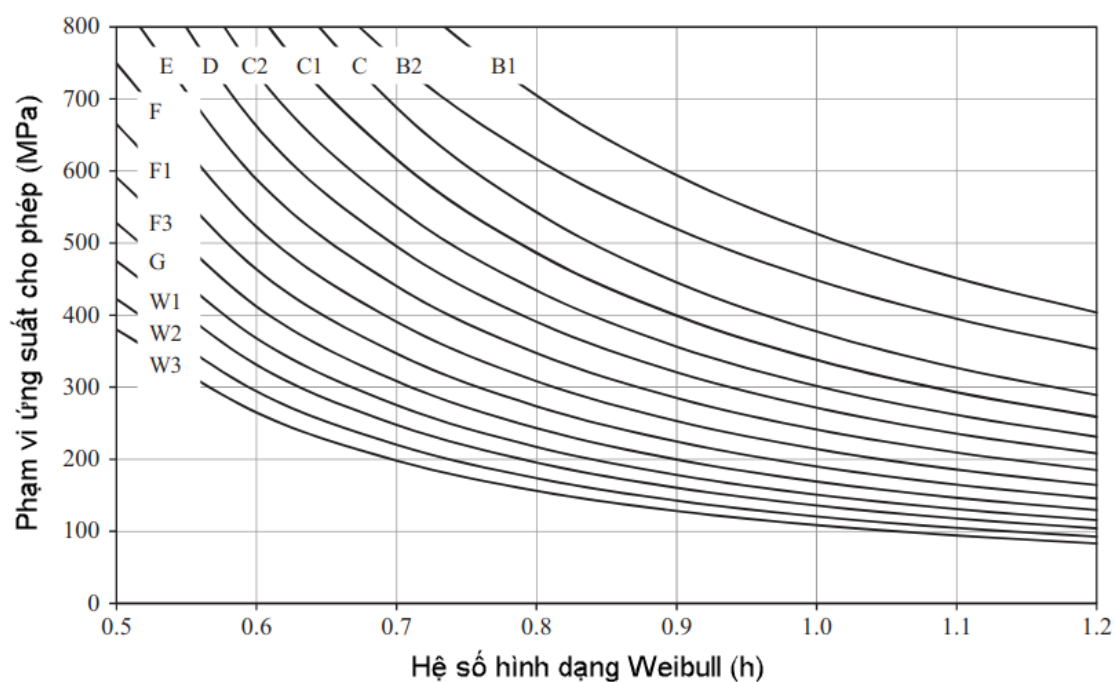
Phương trình này được trình bày trong tiêu chuẩn thiết kế cho kết cấu hàng hải. [12]

2.1.6 Phạm vi ứng suất tối đa cho phép.

Phương trình (2.24) hoặc bảng tính từ Phần 2.1.4 có thể được sử dụng để tính toán phạm vi ứng suất tối đa cho phép trong suốt một giai đoạn thời gian xem xét bằng cách đòi hỏi rằng sự phá hủy mỗi được giới hạn ở $D = 1.0$. Dựa trên điều này, một biểu đồ thiết kế với các phạm vi ứng suất cho phép cho tuổi thọ thiết kế là 20 năm với 10^8 chu kỳ ứng suất bị tạo ra, như được thể hiện trong Hình 2.1. Các ứng suất cho phép được tạo ra cho các hệ số hình dạng Weibull khác nhau, và các đường S-N trong không khí được thể hiện trong Bảng 2.2.

Bảng 2.2 Đường cong S-N trong không khí theo DNVGL-RP-C203 (2016)

Đường cong S-N	$N \leq 10^7$ chu kỳ		$N > 10^7$ chu kỳ $m_2 = 5.0$ $\log a_{d2}$	Ứng suất mỗi giới hạn tại 10^7 chu kỳ (Mpa)	Số mũ độ dày, k	Độ tập trung ứng suất kết cấu
	m_1	$\log a_{d1}$				
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.05	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.10	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50



Hình 2.1 Phạm vi ứng suất cực đại cho phép trong 10^8 chu kỳ đối với các bộ phận trong không khí. (Theo DNVGL-RP-C203 2016).

Bảng 2.3 Hệ số giảm ứng suất tương ứng với hệ số sử dụng, η , cho đường cong C–W3 trong môi trường không khí

Hệ số sử dụng phá hủy mỗi, η	Hệ số hình dạng Weibull, h							
	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
0.10	0.497	0.511	0.526	0.540	0.552	0.563	0.573	0.582
0.20	0.609	0.620	0.632	0.642	0.652	0.661	0.670	0.677
0.22	0.627	0.638	0.648	0.659	0.668	0.677	0.685	0.692
0.27	0.661	0.676	0.686	0.695	0.703	0.711	0.719	0.725
0.30	0.688	0.697	0.706	0.715	0.723	0.730	0.737	0.743
0.33	0.708	0.717	0.725	0.733	0.741	0.748	0.754	0.760
0.40	0.751	0.758	0.765	0.772	0.779	0.785	0.790	0.795
0.50	0.805	0.810	0.816	0.821	0.826	0.831	0.835	0.839
0.60	0.852	0.856	0.860	0.864	0.868	0.871	0.875	0.878
0.67	0.882	0.885	0.888	0.891	0.894	0.897	0.900	0.902
0.70	0.894	0.897	0.900	0.902	0.905	0.908	0.910	0.912
0.80	0.932	0.934	0.936	0.938	0.939	0.941	0.942	0.944

1.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

2.1.6.1 Tác động của Hệ số thiết kế mới (DFF) và các tuổi thọ thiết kế khác

Các ứng suất tối đa cho phép được tính dựa trên Hệ số thiết kế mới (DFF) là 1.0. Các giá trị DFF lớn hơn cho thấy có một số lượng chu kỳ căng mệt lớn hơn, dẫn đến việc giảm phạm vi ứng suất tối đa cho phép để đạt được cùng một lượng phá hủy mỗi tính toán chấp nhận được. Hơn nữa, tuổi thọ trong dịch vụ không nhất thiết phải là 20 năm. Do đó, để sử dụng bảng tính từ Phần 2.1.4, dải ứng suất cho phép có thể được giảm đi bằng một hệ số giảm đã được tính toán cho các tham số hình dạng khác nhau trong Bảng 2.3. Các tuổi thọ phục vụ khác với 20 năm có thể được tính toán bằng cách bao gồm các hệ số sử dụng trong Bảng 2.4. Những hệ số này cũng liên quan đến giá trị của DFF hoặc, trực tiếp hơn, là nghịch đảo của DFF. Hệ số sử dụng thiệt hại một mỗi kết quả trong Bảng 2.3 sau đó được sử dụng để tính toán hệ số giảm cho việc đánh giá một mỗi của kết nối hàn trong môi trường không khí. Hệ số từ Bảng 2.3 được nhân vào các dải ứng suất cho phép từ hình 2.1 để tạo ra một dải ứng suất tối đa cho phép tương ứng với tuổi thọ phục vụ dự kiến và DFF cần thiết.

Bảng 2.4 Các hệ số sử dụng, η , dưới dạng một hàm số của tuổi thọ thiết kế và DFF (DNVGL-RP-C203 2016).

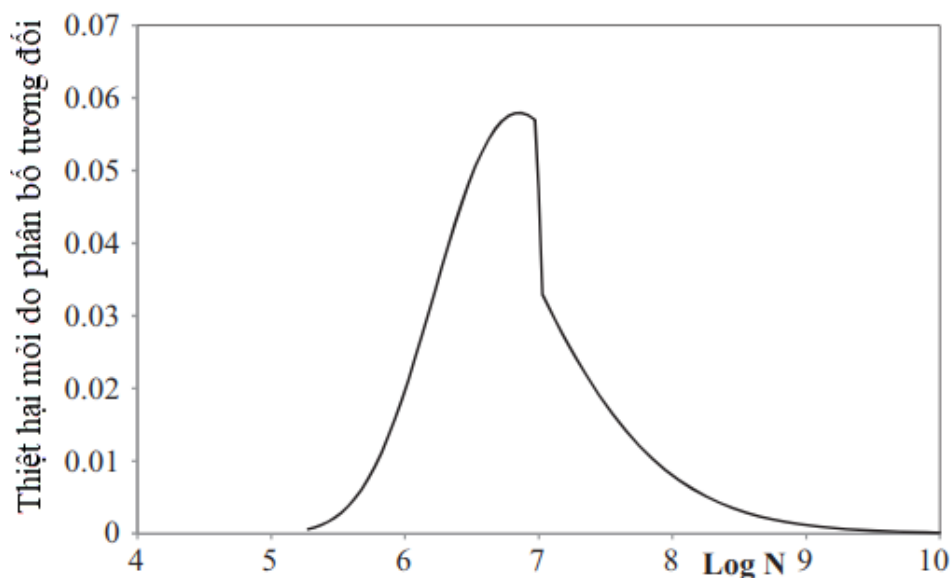
DFF	Tuổi thọ tính theo năm						
	5	10	15	20	25	30	50
1	4.0	2.0	1.33	1.0	0.80	0.67	0.40
2	2.0	1.0	0.67	0.5	0.40	0.33	0.20
3	1.33	0.67	0.44	0.33	0.27	0.22	0.13
5	0.8	0.4	0.27	0.2	0.16	0.13	0.08
10	0.4	0.2	0.13	0.1	0.08	0.07	0.04

2.1.6.2 Một vài hướng dẫn để lựa chọn tham số hình dạng Weibull

Các phá hủy do mỏi được tính toán nhạy cảm đối với giá trị được chọn cho tham số hình dạng Weibull, và điều này làm cho việc sử dụng nó có phần khó khăn trong

một số tình huống. Khái niệm này có thể được sử dụng để đánh giá thiết kế ở giai đoạn thiết kế ban đầu hoặc để mục đích lọc lựa các khu vực quan trọng để tiến hành đánh giá một mức chi tiết hơn. Trong những trường hợp như vậy, nên giả định các tham số hình dạng một cách an toàn. Ví dụ, nếu tham số hình dạng cho một cấu trúc nổi được kỳ vọng sẽ khoảng 1.0, thì có thể sử dụng giá trị trong khoảng từ 1.05 đến 1.10 để đảm bảo an toàn hơn. Một số hướng dẫn về việc lựa chọn tham số hình dạng cho đánh giá một mức của cấu trúc tàu biển có thể được tìm thấy trong DNV CN 30.7 (2014), trong đó tham số hình dạng được trình bày dưới dạng một hàm số của chiều dài tàu. Nó cũng phụ thuộc vào vị trí trong tàu được xem xét. Trước đây, tham số hình dạng trong phân phối Weibull có giá trị khoảng 1.0 cho các cấu trúc nổi và cho các cấu trúc mà phản ứng tải trọng chủ yếu được quy định bởi thành phần khối lượng trong phương trình Morison để tính tải trọng (xem Naess và Moan 2013). Khi tải trọng được quy định nhiều hơn bởi thành phần kháng lực, chẳng hạn như đối với cấu trúc có thành phần mảnh, ví dụ, trong các khung và tháp flare, việc cung cấp lời khuyên về tham số hình dạng thích hợp trở nên khó khăn hơn, vì nó có thể nằm trong một khoảng lớn hơn, từ 0.5 đến 0.9. Do đó, đánh giá một mức dựa trên tải trọng 100 năm, ví dụ, trở nên khá không chắc chắn. Sự không chắc chắn này sẽ được giảm đáng kể nếu tính toán cũng tương ứng với việc xác định đóng góp lớn nhất vào thiệt hại do môi. Nếu có một phạm vi ứng suất xung quanh khu vực mà đóng góp lớn nhất vào thiệt hại do môi được biết đến, thì việc biết chính xác phạm vi căng thẳng lớn nhất trở nên không quan trọng bằng. Điều này có thể được đánh giá dựa trên biểu đồ đóng góp vào thiệt hại do một mức, như được thể hiện trong Hình 2.2. Hướng dẫn sau đây về tham số hình dạng được tìm thấy trong tài liệu (xem, ví dụ, API RP2A-WSD 2014) [12]:

- 0.5 cho căn cứ cố định ở vùng vùng biển vịnh Mexico và truss spars
- 0.7 cho dầm dưới mặt nước và căn sóng động ở vùng vùng biển vịnh Mexico và cảng chân vũng
- 1.0 cho biển Bắc, biển Đông và California Nam (cố định sóng)
- 1.3 cho biển Bắc, biển Đông, California Nam (động) và châu Phi.



Hình 2.2 Đóng góp điển hình vào hỏng hóc do một môi dọc theo đường cong S-N cho một cấu trúc nổi trên biển chịu tải sóng trong suốt 20 năm tuổi thọ dịch vụ.

2.1.7 Quy trình tải trọng và phản ứng kết hợp

Quy trình tải trọng và phản ứng kết hợp được hiểu là sự chồng chất của hai quy trình tải trọng xảy ra đồng thời, dẫn đến một phân bố dài hạn về biên độ ứng suất để tính toán tổn hại do môi. Việc tính toán tổn hại do môi cho từng quy trình này tương đối đơn giản, nhưng tổn hại do môi cho quy trình kết hợp có thể khó khăn hơn vì biên độ ứng suất được nâng cao ở độ dốc âm ngược của đường cong S-N để tính toán tổn hại do môi. Do đó, việc đơn giản cộng dồn tổn hại do môi được tính toán từ từng quy trình này là không bảo thủ.

Tổn hại do môi có thể được cộng dồn nếu các quy trình diễn ra tuần tự theo thời gian, chẳng hạn như tính toán tổn hại do môi do động lực từ việc đóng cọc kết hợp với sự tích tụ tổn hại do môi sau khi lắp đặt do tác động của sóng lên cấu trúc đã lắp đặt. Tương tự, việc vận chuyển một cấu trúc đến khu vực lắp đặt tiếp theo là sự tích tụ tổn hại do môi sau khi lắp đặt do tác động của sóng lên cấu trúc là một ví dụ về các quy trình tuần tự, trong đó tổn hại do môi từ mỗi quy trình có thể được cộng dồn. Naess và Moan (2013) đã mô tả phân tích động phức tạp hơn dưới tác động tải đồng thời. Ví dụ về quy trình kết hợp bao gồm:

- Tải trọng động của một tháp ngọn lửa chịu tác động của gió và được hỗ trợ bởi một cấu trúc áo khoác chịu tác động của sóng;

- Cấu trúc tuabin gió chịu tải trọng từ cả gió, tác động của cánh quạt và tác động của sóng;
- Tàu sản xuất nổi chịu tải trọng từ cả sóng và sóng biển (xem DNV-RP-C206 2012; DNVGL-RP-C203 2016).

Tải trọng kết hợp cũng có thể xuất phát từ tải trọng vận hành xảy ra trên một cấu trúc ngoài phản ứng từ tải trọng môi trường. [12]

2.1.8 Phân tích độ bền mỏi của đường ống

2.1.8.1 Trên tàu sản xuất nổi

Đường ống được lắp đặt trên tàu sản xuất nổi để vận hành một số máy móc là thành phần của thiết bị sản xuất trong cấu trúc thượng tầng. Đường ống được chế tạo bằng cách hàn từ bên ngoài, nghĩa là hàn một mặt cho phân loại S-N. Giả sử đường cong F3 được áp dụng để đánh giá độ bền mỏi của các kết nối này. Đường ống chịu áp suất bên trong 20 bar trong 1.000 chu kỳ trong vòng đời 20 năm của tàu. Nhiệt độ bên trong đường ống tăng từ nhiệt độ môi trường lên 310°C trong mỗi chu kỳ tải.

Câu hỏi đặt ra là làm thế nào để tính toán tuổi thọ mỏi của mỗi hàn đối đầu trong những đường ống này. Trong ví dụ này, giả sử thiệt hại do mỏi được tính toán, D_w , do tác động của sóng dựa trên phân tích độ bền mỏi chi tiết hoặc phân phối dải ứng suất dài hạn Weibull và được tính toán bằng cách sử dụng đường cong S-N cho nhiệt độ môi trường.

Tiếp theo, giả sử các chu kỳ ứng suất do vận hành máy móc được phân bố đều trong suốt vòng đời của tàu. Giả sử dải ứng suất do vận hành máy móc được cộng vào phân phối dải ứng suất dài hạn Weibull, tương ứng với chu kỳ tải trong 20 năm. Thiệt hại do mỏi do phân phối tải mới này, D_{w+o} , sau đó được tính toán bằng số, sử dụng đường cong S-N đại diện cho nhiệt độ 310°C.

Với phân tích này, kết quả là quá nhiều chu kỳ tải vận hành, do đó thiệt hại do mỏi được tính toán trong ví dụ này phải được giảm bởi một hệ số $n_{operation}/n_{waves} = 1000/10^8 = 10^{-5}$. Thiệt hại do mỏi kết quả, D_{tot} , sau đó có thể được rút ra như tổng của hai thiệt hại do mỏi được tính toán (thiệt hại do mỏi chỉ do sóng cộng với thiệt hại do mỏi do sóng và phản ứng vận hành).

Đối với chu kỳ tải vận hành, ảnh hưởng của phản ứng tải sóng được bao gồm hai lần. Điều này có thể được sửa, ngay cả khi nó không đáng kể đối với kết quả số trong ví dụ này.

Tổng thiệt hại do mỏi sau đó được tính như sau:

$$D_{tot} = D_w \left(1 - \frac{n_{operation}}{n_{waves}} \right) + D_{w+o} \frac{n_{operation}}{n_{waves}} \quad (2.37)$$

- Biên độ ứng suất trong đường ống do tải trọng vận hành là 140 MPa và giả sử có 1.000 chu kỳ vận hành trong suốt tuổi thọ.
- Biên độ ứng suất này được cho là bao gồm cả ảnh hưởng do áp suất bên trong và tải trọng nhiệt độ.
- Điều kiện tải trọng 100 năm do sóng tác động lên tàu cho thấy biên độ ứng suất danh nghĩa trong đường ống là 150 MPa.
- Giả sử có thể sử dụng tham số hình dạng Weibull $h = 1.0$ để chuyển tải trọng sang 20 năm bằng cách sử dụng phương trình (2.36).
- Cho $\Delta_{\sigma 20} = 137.95 MPa$
- Giả sử có 10^8 chu kỳ do tải trọng sóng trong 20 năm.
- Đường cong S-N F3 từ Bảng 2.2 trong môi trường không khí được sử dụng cho phân tích độ mỏi.
- Sử dụng các phương trình dạng đóng từ Mục 2.1.2, tổn thương do mỏi $D = 0.468$ được tính toán cho 20 năm tuổi thọ.
- Để cộng dồn biên độ ứng suất cho 1.000 chu kỳ ứng suất vận hành, cần sử dụng một thủ tục số.

Kết quả:

- Tổn thương do mỏi được tính toán bằng cách sử dụng thủ tục này lớn hơn một chút so với tổn thương thu được bằng phương pháp phân tích.
- Sau đó, tính toán dữ liệu S-N tương ứng với nhiệt độ 310°C.
- Ta có $\log a_1 = 11.306$ và $\log a_2 = 14.176$.
- Tổn thương do mỏi cho đường cong S-N này sau đó được tính toán bằng phương trình dạng đóng (1.24), với kết quả $D = 0.936$.

Bảng 2.5 Thiệt hại môi được tính toán để phân bổ ứng suất dài hạn

Số chu kỳ	Phạm vi ứng suất (MPa)	Biên độ ứng suất trung bình trong khối	Tổn hại do môi tính toán tại nhiệt độ phòng	Tổn hại do môi tính toán tại nhiệt độ 310°C	Mức độ hư hỏng do môi bổ sung sau 1.000 chu kỳ ứng suất có biên độ 140 MPa
1	137.95	131.92	2.61E-05	4.54E-05	3.97E-09
5	125.90	123.30	2.67E-05	4.63E-05	4.51E-09
10	120.71	114.68	0.00017	0.0003	3.26E-08
50	108.65	106.06	0.00017	0.0003	3.68E-08
100	103.46	97.44	0.00105	0.00183	2.64E-07
500	91.41	88.82	0.001	0.00173	2.96E-07
1000	86.22	80.19	0.00587	0.0102	2.11E-06
5000	74.17	71.57	0.00521	0.00907	2.34E-06
10000	68.98	62.95	0.02838	0.04935	1.65E-05
50000	56.93	54.33	0.0228	0.03965	1.81E-05
100000	51.74	45.71	0.10866	0.18891	0.00013
500000	39.68	37.09	0.07256	0.12614	0.00014
1000000	34.49	28.47	0.19822	0.45632	0.00094
5000000	22.44	19.85	0.0408	0.10256	0.001
10000000	17.25	11.23	0.01889	0.04749	0.0068
50000000	5.20	2.60	1.58E-05	3.98E-05	0.0072
100000000	0.01				
Tổng			0.5039	1.034	0.0163

Có thể thấy rằng giá trị số (D) hơi bảo thủ, với giá trị D tính toán được là 1,034. Cuối cùng, tổn thương do 1.000 biến đổi ứng suất liên tục ở mức 140 MPa, cùng với phản ứng tải trọng sóng, được tính toán ở cột cuối cùng trong Bảng 10.6. Có thể thấy rằng tổn thương môi bổ sung này tương đối nhỏ. Phương trình (2.37) bây giờ có thể được sử dụng để tính toán tổng tổn thương môi [12]:

$$D_{tot} = 0.936 \left(1 - \frac{1000}{10^8} \right) + 0.0163 = 0.952 \quad (2.38)$$

2.2 Xây dựng chương trình tính toán

Để có đầy đủ các thông số trong việc tính toán sự phá hủy mỏi theo phương pháp phạm vi phân phối ứng suất, ta dùng ngôn ngữ lập trình C# với các hàm có thể ứng dụng để xây dựng chương trình tính toán.

2.2.1 Hàm LoadData

Sử dụng hàm LoadData để làm dữ liệu cho chương trình:

```
public void LoadData()
{
    userList1.Clear();
    using (ExcelPackage package = new
ExcelPackage(new FileInfo("FatigueData.xlsx")))
    {
        ExcelWorksheet workSheet =
package.Workbook.Worksheets[0];
        int rowCount = workSheet.Dimension.Rows;

        int ColCount = workSheet.Dimension.Columns;
        for (int row = 3; row <= rowCount; row++)
        {
            UserInfo1 us = new UserInfo1();
            for (int col = 1; col <= ColCount;
col++)
            {
                try
                {
                    var cellValue =
workSheet.Cells[row, col].Value;
                    if (cellValue != null)
                    {
                        us.SetData1(col - 1,
cellValue.ToString());
                    }
                }
                catch (Exception ex)
                {
                    Debug.WriteLine("Error: " +
ex.Message);
                }
            }
        }
    }
}
```



```

        }
        userList1.Add(us);
        Debug.WriteLine(us.ToString());
    }
    dataPrint1 = userList1;
    dtgExcel.DataSource = userList1;
    cBoxSN.DataSource = userList1;
    cBoxSN.DisplayMember = "SN";
    txtm1.DataBindings.Add(new Binding("Text",
cBoxSN.DataSource, "m1"));
    txtlogad1.DataBindings.Add(new
Binding("Text", cBoxSN.DataSource, "logd1"));
    txtm2.Text = "5";
    txtlogad2.DataBindings.Add(new
Binding("Text", cBoxSN.DataSource, "logd2"));
    txtk.DataBindings.Add(new Binding("Text",
cBoxSN.DataSource, "k"));
    }
}

```

2.2.2 Hàm sự kiện nút Calculate

Sử dụng hàm sự kiện nút Calculate để tính toán các giá trị và xử lý số liệu

```

private void btnCalculate_Click(object sender,
EventArgs e)
{
    UserInfo2 us = new UserInfo2();
    Td = 60 * 60 * 24 * 365 * yearinS;
    txtTd.Text = Td.ToString();
    n0 = v0 * Td;
    txtn0.Text = n0.ToString();
    gammam1 = Gamma(1 + double.Parse(txtm1.Text) /
Wei);
    gammam2 = Gamma(1 + double.Parse(txtm2.Text) /
Wei);
    txtgammam1.Text = gammam1.ToString("F3");
    txtgammam2.Text = gammam2.ToString("F3");
    q = nomStress * SCF / Math.Pow((Math.Log(n0)),
(1 / Wei));
    if (effThick <= ReferThick) txtThicksize.Text =
1.ToString();
    else txtThicksize.Text = Math.Pow(effThick /
ReferThick, double.Parse(txtk.Text)).ToString("F3");
    tSize = double.Parse(txtThicksize.Text);
    txtq.Text = q.ToString("F3");
}

```

```

        kneeStress = Math.Pow(10,
(double.Parse(txtlogad1.Text) - Math.Log10(kneeCycles)) /
double.Parse(txtm1.Text));
        txtkneeStress.Text = kneeStress.ToString("F3");
        S1h = Math.Pow(kneeStress / q, Wei);
        txtS1h.Text = S1h.ToString("F3");
        alglib alglib = new alglib();
        gammadm1 = alglib.incompletegamma(1 +
double.Parse(txtm1.Text) / Wei, S1h);
        gammadm2 = alglib.incompletegamma(1 +
double.Parse(txtm2.Text) / Wei, S1h);
        txtgammadm1.Text = gammadm1.ToString("F3");
        txtgammadm2.Text = gammadm2.ToString("F3");
        Damage = (Math.Pow(tSize,
double.Parse(txtm1.Text)) *
        n0 / (Math.Pow(10,
double.Parse(txtlogad1.Text)))) *
        (Math.Pow(q, double.Parse(txtm1.Text))) *
        (1 - gammadm1) * gammam1 + (Math.Pow(tSize,
double.Parse(txtm2.Text)) *
        n0 / (Math.Pow(10,
double.Parse(txtlogad2.Text)))) *
        (Math.Pow(q, double.Parse(txtm2.Text))) *
(gammadm2) * gammam2;
        txtDamage.Text = Damage.ToString("F3");
        Life = 20 / Damage;
        txtLife.Text = Life.ToString("F3");

        us.SNCurve = cBoxSN.Text;
        us.NomStress = double.Parse(txtnomStress.Text);
        us.SCF = double.Parse(txtSCF.Text);
        us.WeibullShape = double.Parse(txtWei.Text);
        us.CycleN1 = double.Parse(txtkneeCycles.Text);
        us.m1 = double.Parse(txtm1.Text);
        us.logam1 = double.Parse(txtlogad1.Text);
        us.m2 = double.Parse(txtm2.Text);
        us.logam2 = double.Parse(txtlogad2.Text);
        us.YearInService =
double.Parse(txtYearinS.Text);
        us.V0 = double.Parse(txtv0.Text);
        us.EffectiveThickness =
double.Parse(txteffThick.Text);
        us.ReferThickness =
double.Parse(txtReferThick.Text);
        us.k = double.Parse(txtk.Text);
        us.Td = double.Parse(txtTd.Text);
        us.n0 = double.Parse(txtn0.Text);

```

```

        us.q = double.Parse(txtq.Text);
        us.ThickSize = double.Parse(txtThicksize.Text);
        us.Gammam1 = double.Parse(txtgammam1.Text);
        us.Gammam2 = double.Parse(txtgammam2.Text);
        us.Gammadism1 = double.Parse(txtgammadm1.Text);
        us.Gammadism2 = double.Parse(txtgammadm2.Text);
        us.S1 = double.Parse(txtkneeStress.Text);
        us.S1h = double.Parse(txtS1h.Text);
        us.D = double.Parse(txtDamage.Text);
        us.T = double.Parse(txtLife.Text);
        userList2.Add(us);
    }
}

```

2.2.3 Hàm Gamma

Hàm Gamma để tính toán giá trị gamma.

```

public double Gamma(double z)
{
    if (z < 0.5)
    {
        return Math.PI / (Math.Sin(Math.PI * z) *
Gamma(1 - z));
    }
    else
    {
        z -= 1;
        double x = p[0];
        for (int i = 1; i < g + 2; i++)
        {
            x += p[i] / (z + i);
        }
        double t = z + g + 0.5;
        return Math.Sqrt(2 * Math.PI) *
(Math.Pow(t, z + 0.5)) * Math.Exp(-t) * x;
    }
}

```

Như vậy, việc tính toán giá trị $\text{Gamma}\left(1 + \frac{m_1}{h}\right)$ ta có thể sử dụng câu lệnh:

```
gammam1 = Gamma(1 + double.Parse(txtm1.Text) / Wei);
```

Trong đó `double.Parse(txtm1.Text)` là giá trị m_1 được chuyển đổi từ dạng Text sang dạng số học double. Và `Wei` tương ứng là h trong công thức trên.

2.2.4 Hàm Incompletegamma

Tương tự sử dụng hàm incompletegamma để tính toán giá trị Gamma Distribution

```
public static double incompletegamma(double a,
    double x,
    alglib.xparams _params)
{
    double result = 0;
    double igammaepsilon = 0;
    double ans = 0;
    double ax = 0;
    double c = 0;
    double r = 0;
    double tmp = 0;

    igammaepsilon = 0.0000000000000001;
    if( (double)(x)<=(double)(0) ||
(double)(a)<=(double)(0) )
    {
        result = 0;
        return result;
    }
    if( (double)(x)>(double)(1) &&
(double)(x)>(double)(a) )
    {
        result = 1-incompletegamma(a, x, _params);
        return result;
    }
    ax = a*Math.Log(x)-x-gammafunc.lgamma(a, ref
tmp, _params);
    if( (double)(ax)<(double)(-
709.78271289338399) )
    {
        result = 0;
        return result;
    }
    ax = Math.Exp(ax);
    r = a;
    c = 1;
    ans = 1;
    do
    {
        r = r+1;
        c = c*x/r;
        ans = ans+c;
    }
```

```

while( (double)(c/ans)>(double)(igammaepsilon) );
    result = ans*ax/a;
    return result;
}

```

2.2.5 Chương trình tính toán

2.2.5.1 Giao diện chương trình

Giao diện chính của chương trình tính toán như hình 2.3

FATIGUE CALCULATION

Đường cong S-N
 Phạm vi ứng suất danh nghĩa (MPa): 90
 Hệ số tập trung ứng suất (SCF): 3.1
 Hệ số hình dạng weibull: 1.1
 Chu kỳ tại khớp đường cong S-N: 10000000
 m1 (N<N1 chu kỳ): 4
 logad1 (N<N1 chu kỳ): 15.117
 m2 (N>N1 chu kỳ): 5
 logad2 (N>N1 chu kỳ): 17.146
 Thời gian phục vụ (năm): 20
 Tần số vô: 0.159
 Độ dày hiệu quả (mm): 20
 Độ dày tham khảo (mm): 25

Số mũ độ dày k: 0
 Tđ = Thời gian phục vụ
 Số chu kỳ được tính toán: n0
 Hệ số tỉ lệ weibull q
 Độ dày hoặc kích thước được chỉnh sửa
 Gamma (1+m1/h)
 Gamma (1+m2/h)
 Ứng suất tại khớp của đường cong S-N: S1
 (S1/q)^h
 Phân phối Gamma P((1+m1/h), (S1/q)^h)
 Phân phối Gamma P((1+m2/h), (S1/q)^h)
 Thiết hại mỗi do tính toán: D
 Tuổi thọ được tính toán T (years)

Tính toán
 Xuất

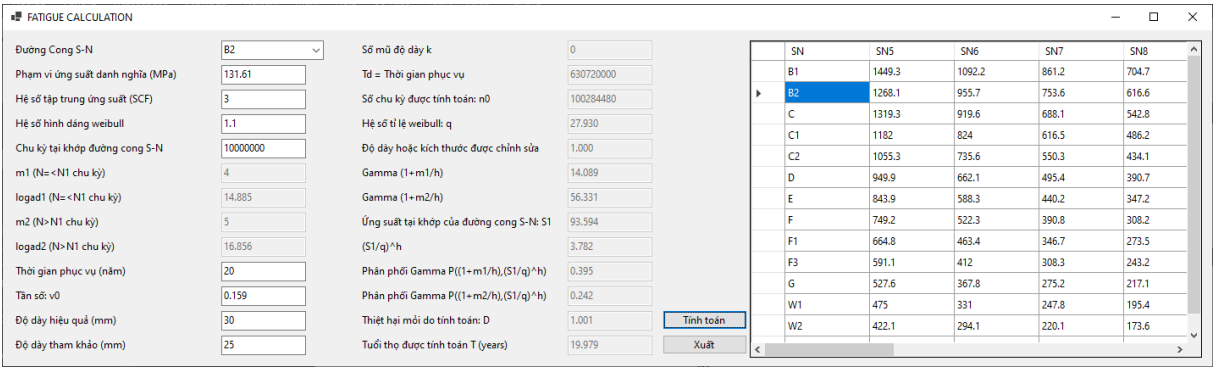
SN	SN5	SN6	SN7	SN8
B1	1449.3	1092.2	861.2	704.7
B2	1268.1	955.7	753.6	616.6
C	1319.3	919.6	688.1	542.8
C1	1182	824	616.5	486.2
C2	1055.3	735.6	550.3	434.1
D	949.9	662.1	495.4	390.7
E	843.9	588.3	440.2	347.2
F	749.2	522.3	390.8	308.2
F1	664.8	463.4	346.7	273.5
F3	591.1	412	308.3	243.2
G	527.6	367.8	275.2	217.1
W1	475	331	247.8	195.4
W2	422.1	294.1	220.1	173.6

Hình 2.3 Giao diện của chương trình tính toán

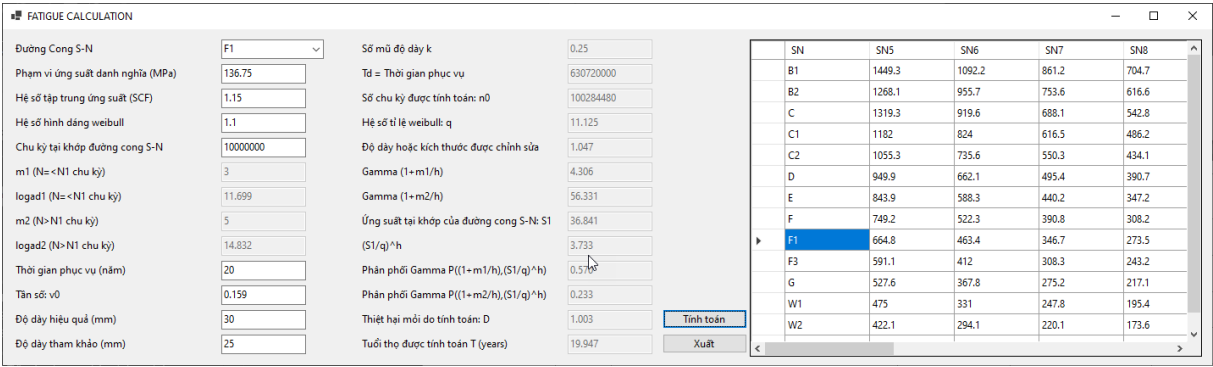
- Các khu vực 1, 2 (khu vực màu đỏ) là các khu vực điền hoặc chọn các giá trị đã được tính toán.
- Các khu vực 3, 4 (khu vực màu xanh lá cây) là các khu vực mà giá trị được tự động tính toán ra dựa trên các thông số được điền vào từ khu vực 1, 2.
- Khu vực 5 (khu vực màu da cam) là khu vực thể hiện các 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.

2.2.5.2 So sánh kết quả của chương trình và bài toán thực tế.

Căn cứ theo mục 2.1.4, nhập các thông số đầu vào tương tự như 2 trường hợp được thể hiện trong bảng 2.1 vào chương trình tính toán sau đó kiểm tra kết quả.



Hình 2.4 Kết quả xuất ra từ chương trình của điểm nóng ví dụ 1



Hình 2.5 Kết quả xuất ra từ chương trình của điểm nóng ví dụ 2

Bảng 2.6 Bảng so sánh kết quả ví dụ 1

STT	Thông số cần so sánh	Ví dụ	Chương trình	Chênh lệch
1	$m_1(N \leq N_1 \quad cycles)$	4	4	0.00%
2	$\log a_{d1}(N \leq N_1 \quad cycles)$	14.885	14.885	0.00%
3	$m_2(N > N_1 \quad cycles)$	5	5	0.00%
4	$\log a_{d2}(N > N_1 \quad cycles)$	16.856	16.856	0.00%
5	Số mũ độ dày: k	0	0	0.00%
6	T _d = Thời gian phục vụ (năm).60.60.24.365	6.31e8	630720000	0.04%
7	Số chu kỳ được tính toán: n ₀	1e8	100284480	0.28%
8	Hệ số tỉ lệ Weibull được tính toán: q	27.932	27.93	0.01%

9	Độ dày hoặc kích thước được chỉnh sửa	1	1	0.00%
10	$\text{Gamma}(1+m_1/h)$	14.089	14.089	0.00%
11	$\text{Gamma}(1+m_2/h)$	56.331	56.331	0.00%
12	Ứng suất tại vị trí khớp của đường cong S-N: S_1	93.594	93.594	0.00%
13	$(S_1/q)^h$	3.781	3.782	0.03%
14	Phân phối Gamma $P\left((1+m_1/h), (S_1/q)^h\right)$	0.395	0.395	0.00%
15	Phân phối gamma $P\left((1+m_2/h), (S_1/q)^h\right)$	0.242	0.242	0.00%
16	Thiệt hại mỗi do tính toán: D	1	1.001	0.10%
17	Tuổi thọ được tính toán T [years]	20.006	19.979	0.14%

Bảng 2.7 Bảng so sánh kết quả ví dụ 2

STT	Thông số cần so sánh	Ví dụ	Chương trình	Chênh lệch
1	$m_1 (N \leq N_1 \text{ cycles})$	3	3	0.00%
2	$\log a_{d1} (N \leq N_1 \text{ cycles})$	11.699	11.699	0.00%
3	$m_2 (N > N_1 \text{ cycles})$	5	5	0.00%
4	$\log a_{d2} (N > N_1 \text{ cycles})$	14.832	14.832	0.00%
5	Số mũ độ dày: k	0.25	0.25	0.00%
6	$T_d = \text{Thời gian phục vụ (năm)}.60.60.24.365$	6.31e8	6.31E+08	0.04%
7	Số chu kỳ được tính toán: n_0	1e8	1E+08	0.28%
8	Hệ số tỉ lệ Weibull được tính toán: q	11.126	11.125	0.01%

9	Độ dày hoặc kích thước được chỉnh sửa	1.047	1.047	0.00%
10	$\text{Gamma}(1+m_1/h)$	4.306	4.306	0.00%
11	$\text{Gamma}(1+m_2/h)$	56.331	56.331	0.00%
12	Ứng suất tại vị trí khớp của đường cong S-N: S_1	36.841	36.841	0.00%
13	$(S_1 / q)^h$	3.733	3.733	0.00%
14	Phân phối Gamma $P\left((1+m_1/h), (S_1/q)^h\right)$	0.57	0.57	0.00%
15	Phân phối gamma $P\left((1+m_2/h), (S_1/q)^h\right)$	0.233	0.233	0.00%
16	Thiệt hại mỗi do tính toán: D	1	1.003	0.30%
17	Tuổi thọ được tính toán T [years]	20.002	19.947	0.28%

Căn cứ kết quả từ ví dụ và giá trị được tính toán từ chương trình, bảng so sánh các giá trị được xây dựng.

Bảng 2.6 và 2.7 cho thấy giá trị chênh lệch của các thông số giữa ví dụ và chương trình tính toán đều không vượt quá 0.3%, điều này chứng minh được rằng chương trình xây dựng đang có độ tin cậy dựa trên các ví dụ thực tế đã được tính toán.

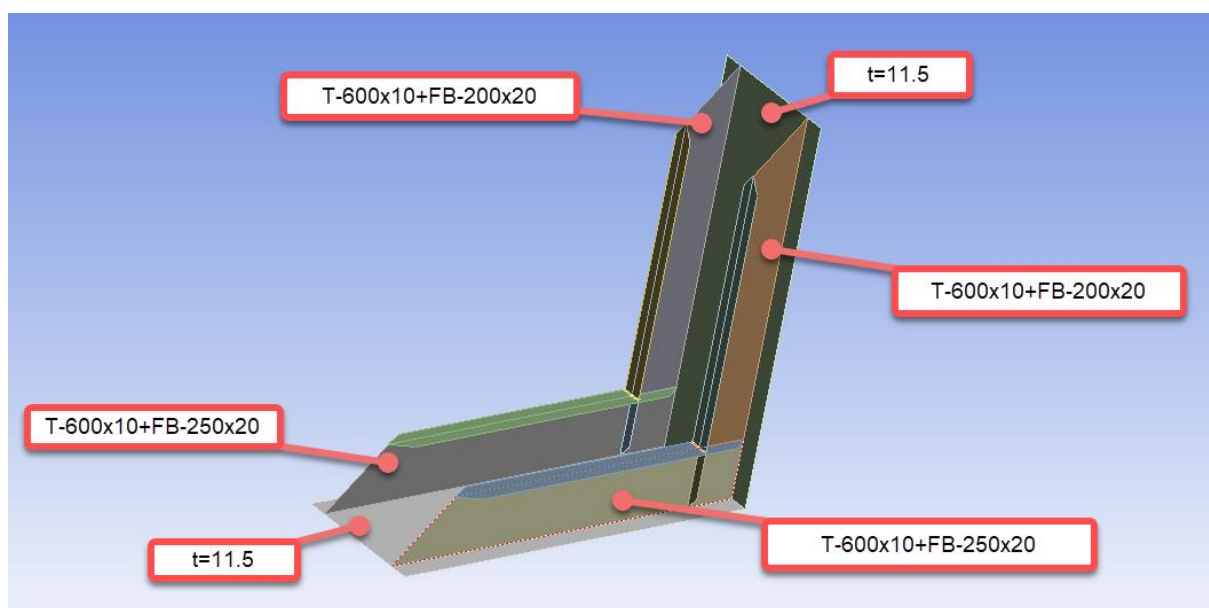
CHƯƠNG 3 NỘI DUNG, KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1 Mô hình tính toán và thông số đầu vào

3.1.1 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 mỏi.

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 $t=11.5\text{mm}$.

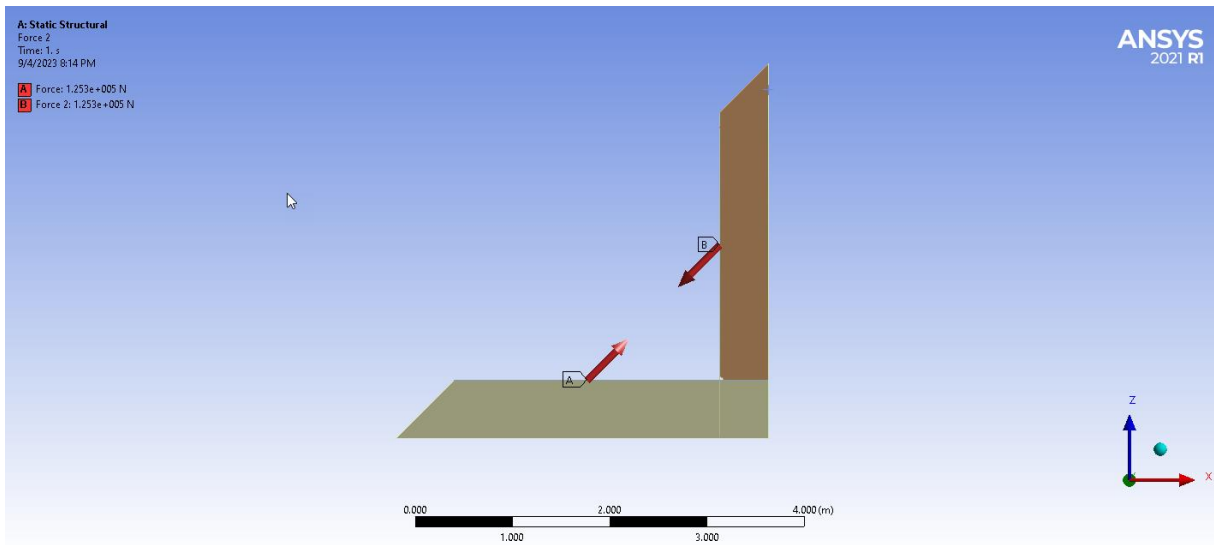


Hình 3.1 Góc khung sườn được nghiên cứu

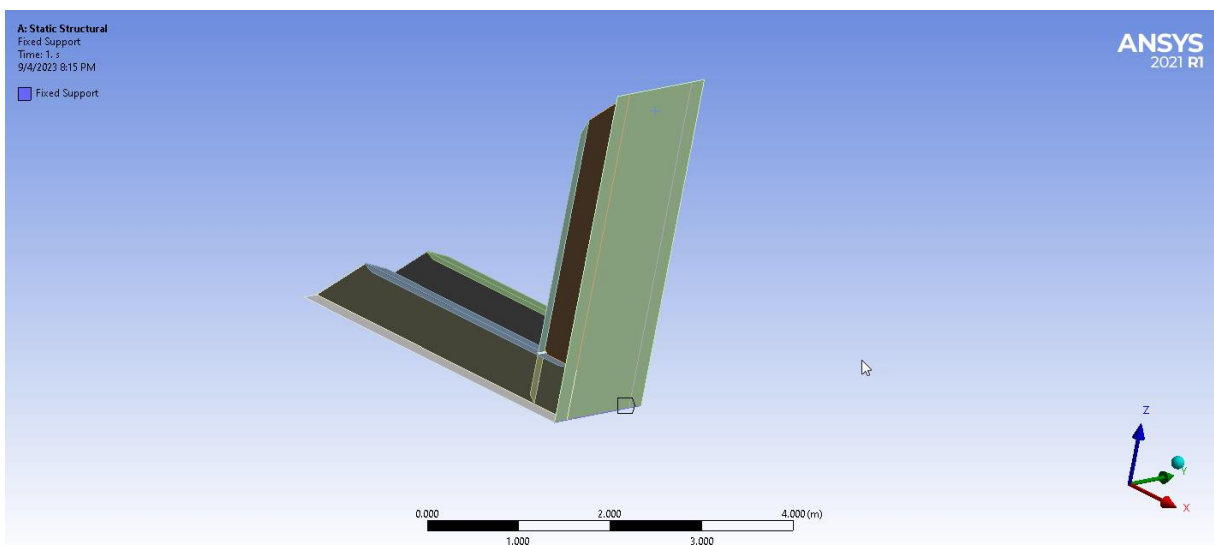
3.1.2 Thông số đầu vào

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.

Điều kiện biên đối với mô hình mô phỏng trong trường hợp này sử dụng điều kiện ngàm chặt đối với đường giao nhau giữa mạn tàu và boong tàu.



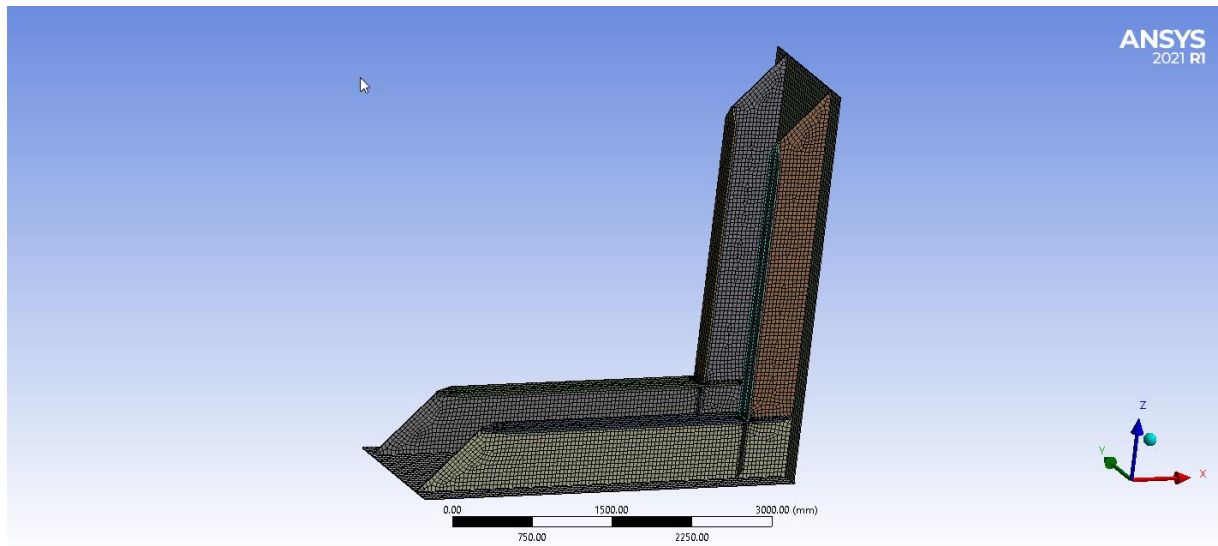
Hình 3.2 Lực tác dụng vào khung sườn



Hình 3.3 Điều kiện biên áp dụng cho khung sườn

3.1.3 Chia lưới mô hình

Mô hình được chia lưới cơ bản phần tử tám với kích thước 40x40 mm.

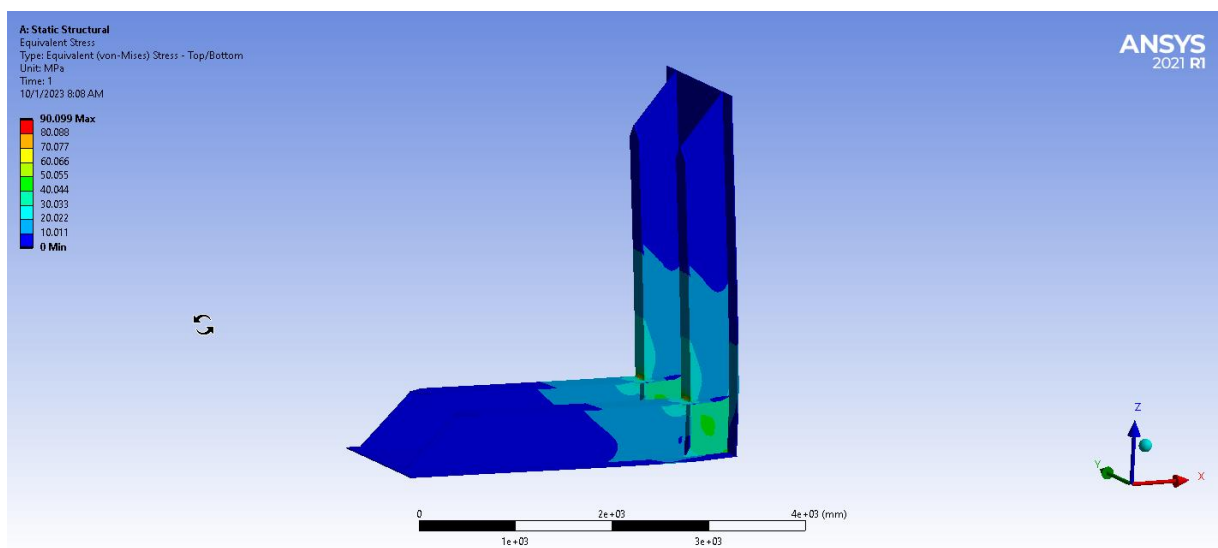


Hình 3.4 Mô hình chia lưới khung sườn.

3.2 Giá trị ứng suất và các thông số cơ bản

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

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



Hình 3.5 Ứng suất lớn nhất

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 mỗi 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 1.2 để xác định ảnh hưởng của hệ số đến việc tính toán độ bền mỗi của kết cấu.
- Thời gian phục vụ (Year in service): 20 năm.
- Effective thickness: 20 mm
- Reference thickness: 25 mm

Lần lượt thực hiện việc tính toán dựa trên bảng tính đã được lập trình và trình bày cụ thể như hình 2.6.

FATIGUE CALCULATION

S-N Curves: B1

Nominal Stress Range (MPa): 90

Hot spot stress factor (SCF): 3.1

Weibull shape parameter: 1.1

Cycles at knee in S-N curve N1: 10000000

m1 (N<N1 cycles): 4

loga1 (N<N1 cycles): 15.117

m2 (N>N1 cycles): 5

loga2 (N>N1 cycles): 17.146

Year in service: 20

Zero up-crossing frequency: v0: 0.159

Effective thickness (mm): 20

Reference thickness: 25

Thickness exponent k: 0

Td = Time in service: 630720000

Calculated number of cycles: n0: 100284480

Weibull scale parameter: q: 19.736

Thickness or size correction: 1

Gamma (1+m1/h): 14.089

Gamma (1+m2/h): 56.331

Stress at knee in S-N curve: S1: 106.967

(S1/q)^h: 6.418

Gamma distribution P((1+m1/h), (S1/q)^h): 0.814

Gamma distribution P((1+m2/h), (S1/q)^h): 0.689

Calculated fatigue damage: D: 0.114

Calculated life time T (years): 175.755

SN	SN5	SN6	SN7	SN8
B1	1449.3	1092.2	861.2	704.7
B2	1268.1	955.7	753.6	616.6
C	1319.3	919.6	688.1	542.8
C1	1182	824	616.5	486.2
C2	1055.3	735.6	550.3	434.1
D	949.9	662.1	495.4	390.7
E	843.9	588.3	440.2	347.2
F	749.2	522.3	390.8	308.2
F1	664.8	463.4	346.7	273.5
F3	591.1	412	308.3	243.2
G	527.6	367.8	275.2	217.1
W1	475	331	247.8	195.4
W2	422.1	294.1	220.1	173.6

Hình 3.6: Bảng tính toán độ bền mỗi của kết cấu thân tàu

3.3 Kết quả

Đối với kết quả tính, bốn trường hợp tính toán được trình bày cụ thể dưới đây, để có cơ sở dữ liệu phân tích.

3.3.1 Trường hợp 1: Thay đổi các giá trị của đường S-N Curves

Đối với trường hợp 1, ta chọn hệ số hình dạng Weibull (h) là 1.1

Bảng 3.1 Bảng tổng hợp tính toán độ bền mỏi trường hợp 1 – 1

STT								
1	STT điểm nóng kết cấu	1	2	3	4	5	6	7
2	Đường cong S-N	B1	B2	C	C1	C2	D	E
3	Phạm vi ứng suất danh nghĩa (MPa)	90	90	90	90	90	90	90
4	Hệ số tập trung ứng suất	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
5	Hệ số Weibull: h	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
6	Chu kỳ tại vị trí khớp của đường cong S-N (N1)	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000
7	$m_1(N \leq N_1 \text{ cycles})$	4	4	3	3	3	3	3
8	$\log a_{d1}(N \leq N_1 \text{ cycles})$	15.117	14.885	12.592	12.449	12.301	12.164	12.01
9	$m_2(N > N_1 \text{ cycles})$	5	5	5	5	5	5	5
10	$\log a_{d2}(N > N_1 \text{ cycles})$	17.146	16.856	16.32	16.081	15.835	15.606	15.35

11	Thời gian phục vụ (năm)	20	20	20	20	20	20	20
12	Tần số: v_0	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159
13	Độ dày hiệu quả [mm]	20	20	20	20	20	20	20
14	Độ dày tham khảo	25	25	25	25	25	25	25
15	Số mũ độ dày: k	0	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
16	T_d = Thời gian phục vụ (năm).60.60.24.365	630720000	630720000	630720000	630720000	630720000	630720000	630720000
17	Số chu kỳ được tính toán: n_0	100284480	100284480	100284480	100284480	100284480	100284480	100284480
18	Hệ số tỉ lệ Weibull được tính toán: q	19.736	19.736	19.736	19.736	19.736	19.736	19.736
19	Độ dày hoặc kích thước được chỉnh sửa	1	1	1	1	1	1	1
20	$\Gamma(1+m_1/h)$	14.089	14.089	4.306	4.306	4.306	4.306	4.306
21	$\Gamma(1+m_2/h)$	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331
22	Ứng suất tại vị trí khớp của đường cong S-N: S_1	106.967	93.594	73.114	65.514	58.479	52.642	46.774
23	$(S_1/q)^h$	6.418	5.541	4.223	3.743	3.303	2.942	2.583

24	Phân phối Gamma $P\left((1+m_1/h), (S_1/q)^h\right)$	0.814	0.708	0.662	0.572	0.479	0.396	0.313
25	Phân phối gamma $P\left((1+m_2/h), (S_1/q)^h\right)$	0.689	0.556	0.32	0.235	0.165	0.115	0.074
26	Thiệt hại mỗi do tính toán: D	0.114	0.212	0.546	0.835	1.272	1.854	2.789
27	Tuổi thọ được tính toán T [years]	175.755	94.144	36.637	23.95	15.718	10.786	7.17

Bảng 3.2 Bảng tổng hợp tính toán độ bền môi trường hợp 1 – 2

STT								
1	STT điểm nóng kết cấu	8	9	10	11	12	13	14
2	Đường cong S-N	F	F1	F3	G	W1	W2	W3
3	Phạm vi ứng suất danh nghĩa (MPa)	90	90	90	90	90	90	90
4	Hệ số tập trung ứng suất	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
5	Hệ số Weibull: h	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
6	Chu kỳ tại vị trí khớp của đường cong S-N (N1)	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000
7	$m_1(N \leq N_1 \text{ cycles})$	3	3	3	3	3	3	3
8	$\log a_{d1}(N \leq N_1 \text{ cycles})$	11.855	11.699	11.546	11.398	11.261	11.107	10.97
9	$m_2(N > N_1 \text{ cycles})$	5	5	5	5	5	5	5
10	$\log a_{d2}(N > N_1 \text{ cycles})$	15.091	14.832	14.576	14.33	14.101	13.845	13.617
11	Thời gian phục vụ (năm)	20	20	20	20	20	20	20
12	Tần số: v_0	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159

13	Độ dày hiệu quả [mm]	20	20	20	20	20	20	20
14	Độ dày tham khảo	25	25	25	25	25	25	25
15	Số mũ độ dày: k	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
16	T_d = Thời gian phục vụ (năm).60.60.24.365	630720000	630720000	630720000	630720000	630720000	630720000	630720000
17	Số chu kỳ được tính toán: n_0	100284480	100284480	100284480	100284480	100284480	100284480	100284480
18	Hệ số tỉ lệ Weibull được tính toán: q	19.736	19.736	19.736	19.736	19.736	19.736	19.736
19	Độ dày hoặc kích thước được chỉnh sửa	1	1	1	1	1	1	1
20	$\text{Gamma}(1+m_1/h)$	4.306	4.306	4.306	4.306	4.306	4.306	4.306
21	$\text{Gamma}(1+m_2/h)$	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331
22	Ứng suất tại vị trí khớp của đường cong S-N: S_1	41.527	36.841	32.759	29.242	26.323	23.388	21.054
23	$(S_1 / q)^h$	2.267	1.987	1.746	1.541	1.373	1.205	1.074
24	Phân phối Gamma $P\left((1+m_1/h), (S_1/q)^h\right)$	0.24	0.179	0.132	0.096	0.071	0.049	0.035

25	Phân phối gamma $P\left((1+m_2/h), (S_1/q)^h\right)$	0.046	0.028	0.017	0.01	0.006	0.003	0.002
26	Thiệt hại mỗi do tính toán: D	4.157	6.142	8.939	12.772	17.703	25.461	35.1
27	Tuổi thọ được tính toán T [years]	4.812	3.256	2.237	1.566	1.13	0.786	0.57

3.3.2 Trường hợp 2: Thay đổi hệ số hình dạng Weibull

Bảng 3.3 Bảng tổng hợp tính toán độ bền mỗi trường hợp 2

STT								
1	STT điểm nóng kết cấu	1	2	3	4	5	6	7
2	Đường cong S-N	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
3	Phạm vi ứng suất danh nghĩa (MPa)	90	90	90	90	90	90	90
4	Hệ số tập trung ứng suất	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
5	Hệ số Weibull: h	0.5	0.7	0.9	1	1.1	1.2	1.3
6	Chu kỳ tại vị trí khớp của đường cong S-N (N1)	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000
7	$m_1(N \leq N_1 \text{ cycles})$	4	4	4	4	4	4	4
8	$\log a_{d1}(N \leq N_1 \text{ cycles})$	15.117	15.117	15.117	15.117	15.117	15.117	15.117
9	$m_2(N > N_1 \text{ cycles})$	5	5	5	5	5	5	5
10	$\log a_{d2}(N > N_1 \text{ cycles})$	17.146	17.146	17.146	17.146	17.146	17.146	17.146
11	Thời gian phục vụ (năm)	20	20	20	20	20	20	20
12	Tần số: v_0	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159

13	Độ dày hiệu quả [mm]	20	20	20	20	20	20	20
14	Độ dày tham khảo	25	25	25	25	25	25	25
15	Số mũ độ dày: k	0	0	0	0	0	0	0
16	T_d = Thời gian phục vụ (năm).60.60.24.365	630720000	630720000	630720000	630720000	6.31E+08	6.31E+08	6.31E+08
17	Số chu kỳ được tính toán: n_0	100284480	100284480	100284480	100284480	1E+08	1E+08	1E+08
18	Hệ số tỉ lệ Weibull được tính toán: q	0.822	4.344	10.956	15.144	19.736	24.611	29.665
19	Độ dày hoặc kích thước được chỉnh sửa	1	1	1	1	1	1	1
20	$\Gamma(1+m_1/h)$	40320	424.338	47.876	24	14.089	9.261	6.614
21	$\Gamma(1+m_2/h)$	3628800	6730.873	318.119	120	56.331	30.942	19.087
22	Ứng suất tại vị trí khớp của đường cong S-N: S_1	106.967	106.967	106.967	106.967	106.967	106.967	106.967
23	$(S_1/q)^h$	11.408	9.417	7.774	7.063	6.418	5.831	5.298
24	Phân phối Gamma $P\left((1+m_1/h), (S_1/q)^h\right)$	0.802	0.854	0.847	0.833	0.814	0.79	0.763

25	Phân phối gamma $P\left((1+m_2/h), (S_1/q)^h\right)$	0.588	0.706	0.718	0.707	0.689	0.665	0.637
26	Thiệt hại mỗi do tính toán: D	0.001	0.007	0.034	0.065	0.114	0.188	0.293
27	Tuổi thọ được tính toán T [years]	23465.229	2875.035	589.271	309.538	175.755	106.526	68.223

3.3.3 Trường hợp 3: Thay đổi số năm phục vụ (Year in service)

Bảng 3.4 Bảng tổng hợp tính toán độ bền mỗi trường hợp 3

STT								
1	STT điểm nóng kết cấu	1	2	3	4	5	6	7
2	Đường cong S-N	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
3	Phạm vi ứng suất danh nghĩa (MPa)	90	90	90	90	90	90	90
4	Hệ số tập trung ứng suất	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
5	Hệ số Weibull: h	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
6	Chu kỳ tại vị trí khớp của đường cong S-N (N1)	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000
7	$m_1(N \leq N_1 \text{ cycles})$	4	4	4	4	4	4	4
8	$\log a_{d1}(N \leq N_1 \text{ cycles})$	15.117	15.117	15.117	15.117	15.117	15.117	15.117
9	$m_2(N > N_1 \text{ cycles})$	5	5	5	5	5	5	5
10	$\log a_{d2}(N > N_1 \text{ cycles})$	17.146	17.146	17.146	17.146	17.146	17.146	17.146
11	Thời gian phục vụ (năm)	10	15	20	25	30	40	50
12	Tần số: v_0	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159

13	Độ dày hiệu quả [mm]	20	20	20	20	20	20	20
14	Độ dày tham khảo	25	25	25	25	25	25	25
15	Số mũ độ dày: k	0	0	0	0	0	0	0
16	T_d = Thời gian phục vụ (năm).60.60.24.365	315360000	473040000	630720000	788400000	946080000	1261440000	1576800000
17	Số chu kỳ được tính toán: n_0	50142240	75213360	100284480	125355600	150426720	200568960	250711200
18	Hệ số tỉ lệ Weibull được tính toán: q	20.436	20.021	19.736	19.521	19.35	19.085	18.884
19	Độ dày hoặc kích thước được chỉnh sửa	1	1	1	1	1	1	1
20	$\Gamma(1+m_1/h)$	14.089	14.089	14.089	14.089	14.089	14.089	14.089
21	$\Gamma(1+m_2/h)$	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331
22	Ứng suất tại vị trí khớp của đường cong S-N: S_1	106.967	106.967	106.967	106.967	106.967	106.967	106.967
23	$(S_1/q)^h$	6.176	6.318	6.418	6.495	6.559	6.659	6.737
24	Phân phối Gamma $P\left((1+m_1/h), (S_1/q)^h\right)$	0.788	0.803	0.814	0.821	0.827	0.837	0.843

25	Phân phối gamma $P\left((1+m_2/h), (S_1/q)^h\right)$	0.655	0.675	0.689	0.699	0.708	0.721	0.73
26	Thiệt hại mỗi do tính toán: D	0.067	0.091	0.114	0.135	0.155	0.194	0.231
27	Tuổi thọ được tính toán T [years]	298.21	219.021	175.755	148.084	128.692	103.054	86.691

3.3.4 Trường hợp 4: Hệ số tập trung ứng suất thay đổi

Bảng 3.5 Bảng tổng hợp tính toán độ bền mỗi trường hợp 4

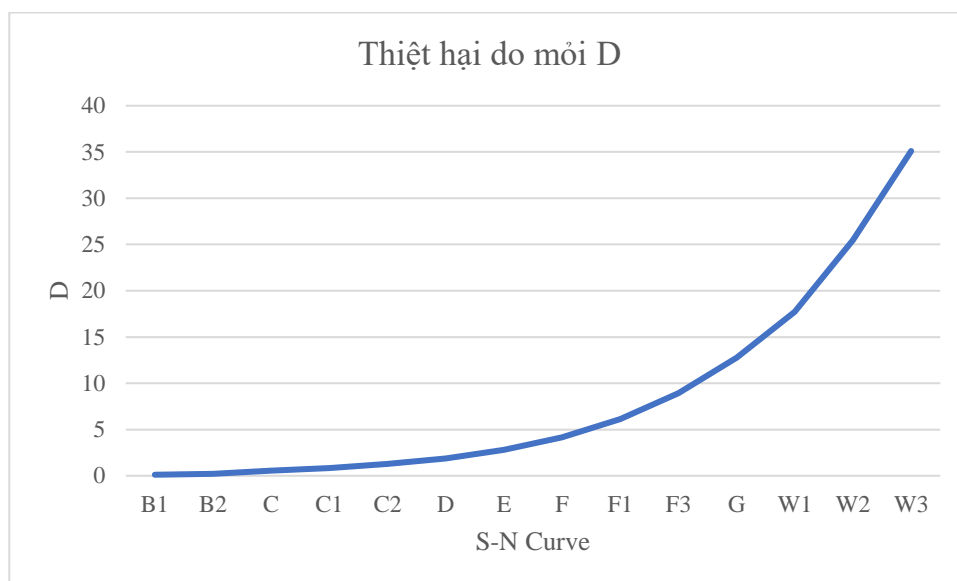
STT								
1	STT điểm nóng kết cấu	1	2	3	4	5	6	7
2	Đường cong S-N	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
3	Phạm vi ứng suất danh nghĩa (MPa)	90	90	90	90	90	90	90
4	Hệ số tập trung ứng suất	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.3	3.4
5	Hệ số Weibull: h	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
6	Chu kỳ tại vị trí khớp của đường cong S-N (N_1)	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000
7	$m_1(N \leq N_1 \text{ cycles})$	4	4	4	4	4	4	4
8	$\log a_{d1}(N \leq N_1 \text{ cycles})$	15.117	15.117	15.117	15.117	15.117	15.117	15.117
9	$m_2(N > N_1 \text{ cycles})$	5	5	5	5	5	5	5
10	$\log a_{d2}(N > N_1 \text{ cycles})$	17.146	17.146	17.146	17.146	17.146	17.146	17.146
11	Thời gian phục vụ (năm)	20	20	20	20	20	20	20
12	Tần số: v_0	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159

13	Độ dày hiệu quả [mm]	20	20	20	20	20	20	20
14	Độ dày tham khảo	25	25	25	25	25	25	25
15	Số mũ độ dày: k	0	0	0	0	0	0	0
16	T_d = Thời gian phục vụ (năm).60.60.24.365	630720000	630720000	630720000	630720000	630720000	630720000	630720000
17	Số chu kỳ được tính toán: n_0	100284480	100284480	100284480	100284480	100284480	100284480	100284480
18	Hệ số tỉ lệ Weibull được tính toán: q	17.826	18.463	19.1	19.736	20.373	21.01	21.646
19	Độ dày hoặc kích thước được chỉnh sửa	1	1	1	1	1	1	1
20	$\Gamma(1+m_1/h)$	14.089	14.089	14.089	14.089	14.089	14.089	14.089
21	$\Gamma(1+m_2/h)$	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331	56.331
22	Ứng suất tại vị trí khớp của đường cong S-N: S_1	106.967	106.967	106.967	106.967	106.967	106.967	106.967
23	$(S_1/q)^h$	7.178	6.906	6.653	6.418	6.197	5.991	5.798
24	Phân phối Gamma $P\left((1+m_1/h), (S_1/q)^h\right)$	0.878	0.858	0.836	0.814	0.791	0.767	0.743

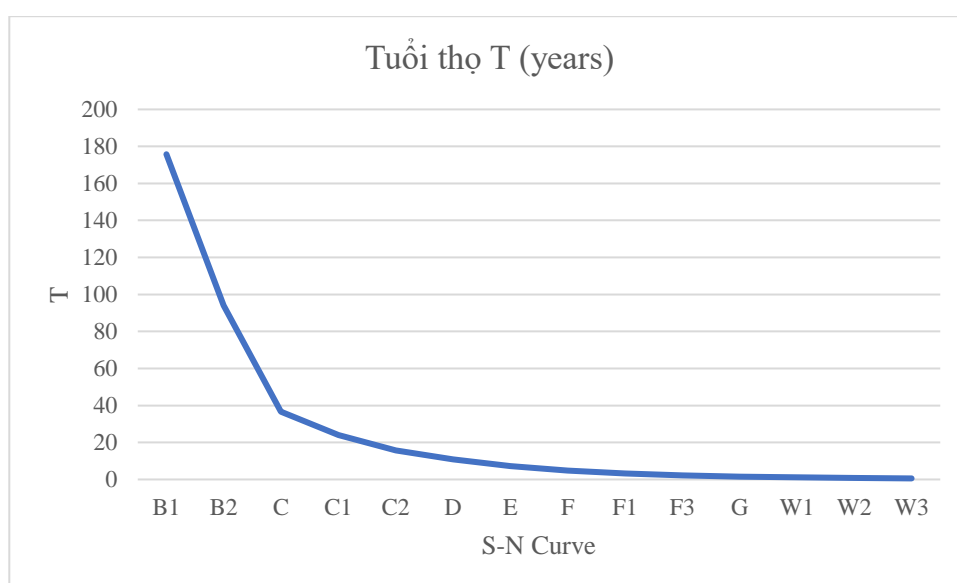
25	Phân phối gamma $P\left((1+m_2/h), (S_1/q)^h\right)$	0.781	0.75	0.72	0.689	0.658	0.628	0.598
26	Thiệt hại mỗi do tính toán: D	0.07	0.083	0.097	0.114	0.132	0.153	0.176
27	Tuổi thọ được tính toán T [years]	285.638	241.387	205.339	175.755	151.305	130.965	113.938

3.4 Đánh giá và phân tích

3.4.1 Trường hợp 1:



Hình 3.7 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của loại đường S-N curve đến thiệt hại môi do tính toán

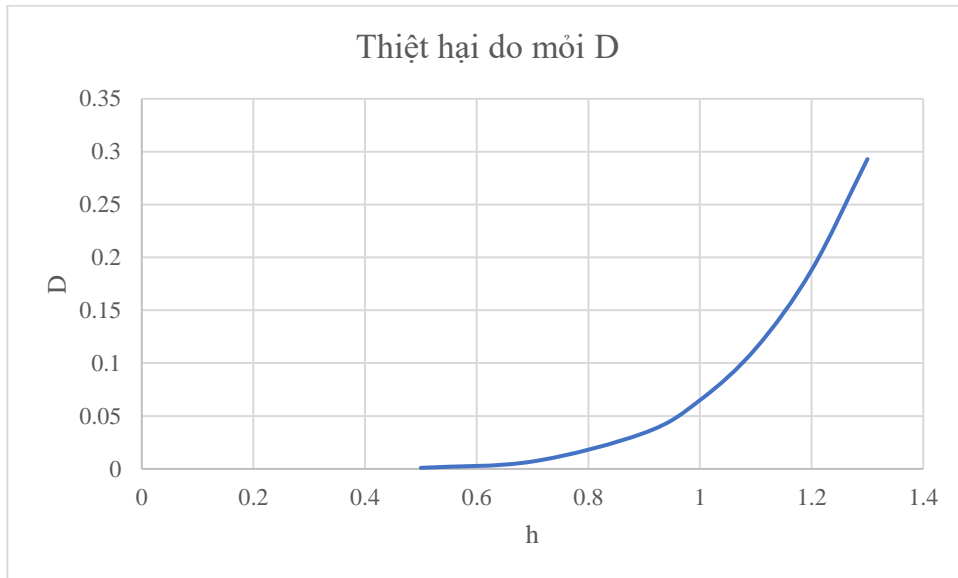


Hình 3.8 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của loại đường S-N curve đến tuổi thọ tính toán

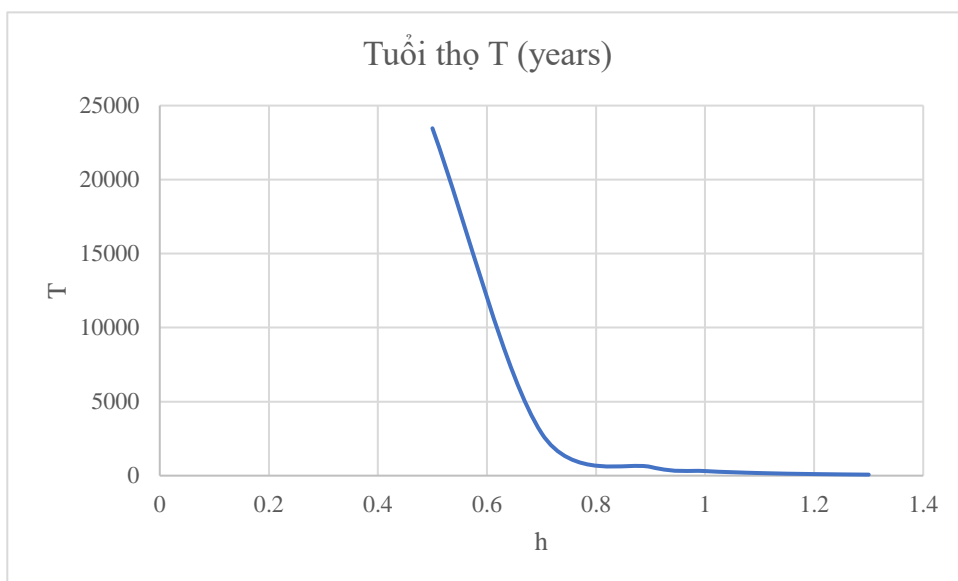
Hai đồ thị hình 3.7 và hình 3.8 cho thấy việc lựa chọn loại đường cong S-N là rất quan trọng trong việc xác định thiệt hại và tuổi thọ môi. Như vậy, để lựa chọn được đường cong S-N để tiến hành phân tích môi thì phải quan tâm đến môi trường hoạt động của kết cấu, vật liệu, nhiệt độ, tải trọng và điều kiện tải.

Hai đồ thị trên cho thấy, điều kiện môi trường càng khắc nghiệt thì thiệt hại do môi càng cao, dẫn đến việc tuổi thọ sẽ giảm dần.

3.4.2 Trường hợp 2:



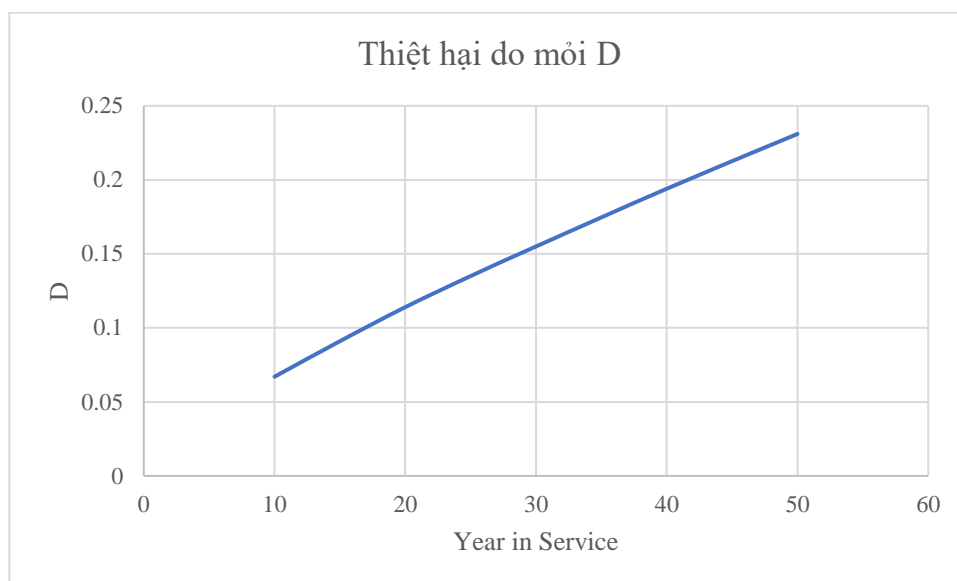
Hình 3.9 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của hệ số hình dạng Weibull đến thiệt hại môi do tính toán



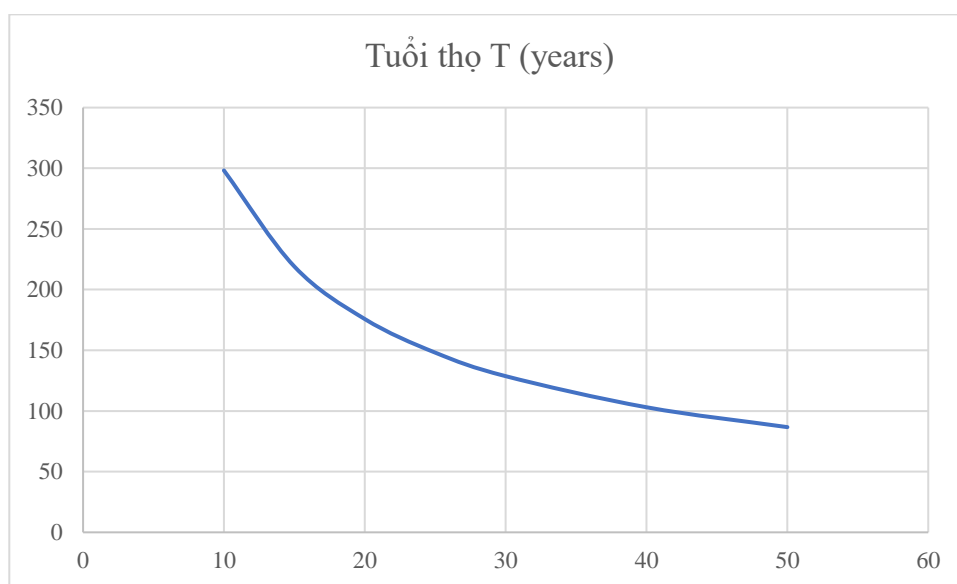
Hình 3.10 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của hệ số hình dạng Weibull đến tuổi thọ tính toán

Đối với trường hợp thay đổi hệ số hình dạng Weibull, tuổi thọ và thiệt 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 thiệt hại do môi càng lớn, đồng thời tuổi thọ môi sẽ càng giảm.

3.4.3 Trường hợp 3:



Hình 3.11 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của số năm phục vụ đến thiệt hại mỗi do tính toán



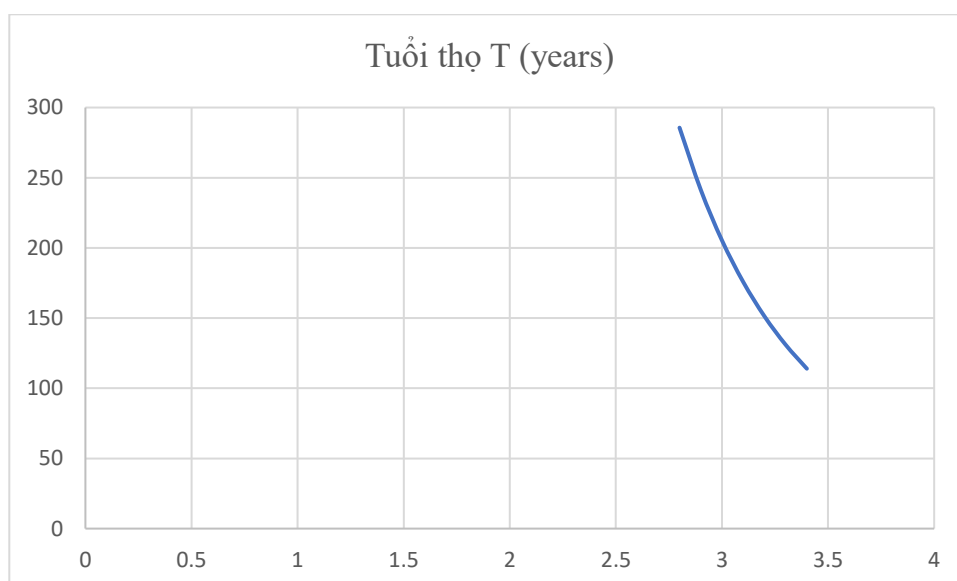
Hình 3.12 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của số năm phục vụ đến tuổi thọ tính toán

Việc xác định số năm phục vụ cũng ảnh hưởng lớn đến việc xác định thiệt hại do mỏi và độ bền mỏi. Với cùng các thông số khác, nếu xác định số năm phục vụ của kết cấu càng lớn, tuổi thọ kết cấu sẽ càng giảm và thiệt hại mỏi sẽ càng tăng.

3.4.4 Trường hợp 4:



Hình 3.13 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của hệ số tập trung ứng suất đến thiệt hại mỗi do tính toán



Hình 3.14 Đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của hệ số tập trung ứng suất đến tuổi thọ tính toán

Đối với hệ số tập trung ứng suất, nếu hệ số này càng gia tăng, thiệt hại do mỏi sẽ càng tăng và giá trị tuổi thọ kết cấu cũng sẽ càng giảm.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

KẾT LUẬN

Luận văn "**Nghiên cứu phương pháp đánh giá tổn thương mỏi 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 mỏi 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 mỏi của kết cấu, và cũng có nghiên cứu nêu ra các vấn đề liên quan đến tuổi thọ kết cấu.
- Trình bày được cơ sở lý thuyết về phương pháp phạm vi phân phối ứng suất.
- Đã xây dựng được chương trình hỗ trợ tính toán, dựa trên ngôn ngữ C# với sự hỗ trợ của Visual Studio.
- 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 mỏi và tuổi thọ của kết cấu tàu.
- Luận văn cũng đã có những đánh giá về các yếu tố tác động đến độ bền mỏi của kết cấu, tuổi thọ của kết cấu

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.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [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, DOI (2021) 1-23.
- [2] Yang W.H., A generalized von mises criterion for yield and fracture, Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME, 47 (1980) 297-300.
- [3] Mrozinski S., Energy-based method of fatigue damage cumulation., Internatinal Journal of Fatigue, 121 (2019) 73-83.
- [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, 11 (1988) 149-165.
- [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, 81 (1959) 301-305.
- [6] B.M.C. Đỗ Văn Sĩ, Tạ Văn San, Xác định mỗi 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, 58 (2022) 62-65.
- [7] B.M.C. Đỗ Văn Sĩ, Nguyễn Văn Dương, Tính toán mức tăng tuổi thọ mỗi 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, 57 (2021) 58-63.
- [8] 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 mỗi của chi tiết máy khi chịu trạng thái ứng suất phức tạp, Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, DOI (2022) 32-45.
- [9] H.P. Wolfgang Fricke., Full-scale fatigue tests of ship structures to validate the S–N approaches for fatigue strength assessment, Maritime Structure, DOI (2010).
- [10] 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, 34(2) (2020) 120-127.
- [11] S.M.L. Myung Hyun Kim, Jae Myung Lee, Byung Jae Noh, Wha Soo Kim, Fatigue strength assessment of MARK-III type LNG cargo containment system, Ocean Engineering, 37 (2010) 1243-1252.
- [12] I. Lotsberg, FATIGUE DESIGN OF MARINE STRUCTURES, Cambridge University Press 2016.