

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Литвиненко Дмитро Юрійович

УДК 629.5.015.4:539.431

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНОГО МЕТОДУ
РОЗРАХУНКУ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ СУДНОВИХ КОРПУСНИХ
КОНСТРУКЦІЙ**

Спеціальність 05.08.03 – Конструювання та будування суден

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Коростильов Леонтій Іванович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, м. Миколаїв,
професор кафедри конструкції та механіки судна.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Конопльов Анатолій Васильович,
Одеський національний морський
університет, м. Одеса,
завідувач кафедри «Машинознавство»;

кандидат технічних наук, доцент
Давидов Ігор Пилипович,
Національний університет «Одеська морська
академія», м. Одеса,
завідувач кафедри теорії та устрою судна.

Захист відбудеться «15» жовтня 2019 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: ауд. 360, просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025 та на сайті: <http://nuos.edu.ua>.

Автореферат розісланий «10» вересня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д-р техн. наук, професор



В. В. Зайцев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Протягом терміну служби конструкції корпусу судна зазнають значних змінних навантажень, які спричинені дією на корпус морського хвилювання, вібрацією від роботи гвинтів та двигуна, зміною станів навантаження судна. Корпус судна традиційно проектується з урахуванням максимальних навантажень. В той же час, зростання важливості забезпечення втомної міцності суднокорпусних конструкцій обумовлюється такими факторами: зменшенням товщин конструкцій завдяки розширенню використання скінченно-елементного аналізу; застосуванням сталей підвищеної міцності; зростанням відношення потужності енергетичної установки до маси судна.

З питань втомної міцності зварних вузлів та, зокрема, суднокорпусних конструкцій, була виконана значна кількість досліджень вітчизняними та закордонними вченими, серед яких Петінов С.В., Максимаджи А.І., Коростильов Л.І., Биков В.А., Бойцов Г.В., Палій О.М., Волков В.М., Труфяков В.І., Гучинський Р.В., Manson S.S., Stephens Ralph I., Fatemi Ali, Fricke W., Radaj D., Sonsino C.M., Haibach E., Niemi E., Hobbacher A. та інші.

Проблема втомної міцності суднокорпусних вузлів активно досліджується та до теперішнього часу розроблено ряд розрахункових і розрахунково-експериментальних методів оцінки рівня втомного пошкодження вузлів. Найбільш придатним для розв'язання низки задач втомної міцності можна вважати експериментально-теоретичний метод (далі ЕТМ), який, однак, потребує удосконалення для його практичного використання.

Експериментально-теоретичний метод розрахунку втомної міцності суднокорпусних конструкцій розроблено на кафедрі будівельної механіки корабля Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (далі НУК). Базовий варіант ЕТМ призначено для розрахунків циклічної міцності при навантаженні незмінного розмаху. Деякі інші методи розрахунку втомної міцності, що широко застосовуються на практиці, між тим, дозволяють визначати циклічну міцність зварних вузлів при навантаженні нерегулярного характеру. Останнє є характерним для суднокорпусних конструкцій. Крім того, при побудові кривих втоми типових осередків концентрації з використанням базового варіанту методу не враховуються середні напруження циклу на малоцикловій ділянці кривої втоми.

Для практичного використання ЕТМ необхідно розробити методику визначення теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень для зварних суднокорпусних вузлів, що дозволить мінімально застосовувати розрахункові комплекси скінченно-елементного аналізу. При цьому потрібно враховувати, що на вказаний коефіцієнт мають суттєвий вплив місцеві геометричні параметри зварного шва в районі переходу від основного до наплавленого металу. Ці параметри залежать від багатьох факторів, в тому числі й випадкових.

На практиці необхідно розв'язувати наступні задачі: оцінка втомної міцності суднокорпусного вузла при навантаженні регулярного і стохастичного характеру; визначення параметрів допустимого зовнішнього навантаження на суднокорпусний

вузол за умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності; проектування суднокорпусного вузла за аналогічної умови.

Алгоритми розв'язку перелічених задач з використанням ЕТМ для випадків дії нерегулярного та стохастичного навантаження повинні бути розробленими та відображеними у практичних методиках. Для побудови кривих втоми та автоматизації розрахунків на базі таких методик необхідно розробити відповідне програмне забезпечення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Проблема втомної міцності зварних вузлів суднокорпусних конструкцій загалом активно досліджується останніми десятиріччями фахівцями в провідних країнах світу. Дисертаційна робота відповідає основним напрямкам досліджень Кораблебудівного навчально-наукового інституту НУК та узгоджується із наступними нормативно-правовими актами України: Законом «Про проведення економічного експерименту щодо державної підтримки суднобудівної промисловості» № 5209-VI від 06.09.2012 р.; Законом «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», стаття 4, пункт 2 «Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки» (№ 5460-VI від 16.10.2012 р.); Розпорядженням Кабінету Міністрів України «Про схвалення Транспортної стратегії України на період до 2020 року» № 2174-р від 20.10.2010; Законом «Про внесення змін до Митного кодексу України (щодо збереження та розвитку вітчизняної суднобудівної промисловості)» № 6475 від 19.05.2017 р.

Дисертаційна робота містить результати досліджень, які було отримано при виконанні наступних науково-дослідних робіт (НДР): держбюджетної НДР № 1769 «Удосконалення методів розрахунку граничної й утомної міцності конструкцій корпусів суден на основі моделювання експлуатаційних навантажень» (2010-2011 р.р., номер державної реєстрації 0110U001326) та госпрозрахункової НДР № 1789 «Разработка рекомендаций по предотвращению трещин усталости на днище земснарядов», в яких здобувач брав участь як виконавець.

Мета дисертаційного дослідження полягає в удосконаленні експериментально-теоретичного методу оцінки втомної міцності та розробці на його основі практичних методик розв'язку задач втомної міцності конструктивних вузлів корпусу судна.

Задачі дисертаційного дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі.

1. Обґрунтувати доцільність використання експериментально-теоретичного методу для розрахунку втомної міцності конструкцій корпусу судна та удосконалити класифікацію методів оцінки циклічної міцності вказаних конструкцій.
2. Розробити алгоритм оцінки втомної міцності типових осередків концентрації напружень при нерегулярному навантаженні.
3. Розробити критеріальні залежності експериментально-теоретичного методу для розрахунку втомної міцності типових осередків концентрації при навантаженні нерегулярного характеру.

4. Дослідити можливість та необхідність урахування середніх напружень циклу на другій малоцикловій ділянці кривої втомного концентратора, а також необхідність врахування залишкових зварювальних напружень при розрахунку втомної міцності суднокорпусних конструкцій.
5. Розробити спрощений метод визначення теоретичних коефіцієнтів концентрації зварних суднокорпусних вузлів, що дозволить мінімально використовувати розрахункові комплекси скінченно-елементного аналізу.
6. Розробити практичні методики та програмне забезпечення для розв'язку задач оцінки втомної міцності суднокорпусного вузла при регулярному і стохастичному навантаженні, а також проектування вузла та визначення параметрів допустимого навантаження із умови забезпечення заданого рівня втомної міцності.

Об'єктом дослідження виступає накопичення втомних пошкоджень у тонкостінних конструкціях корпусу судна.

Предметом дослідження є експериментально-теоретичний метод розрахунку втомної міцності зварних суднокорпусних вузлів.

Для виконання досліджень використовувались наступні **методи**.

1. Загальнонаукові методи та прийоми дослідження (формалізація, гіпотетико-дедуктивний метод, аналіз та синтез, абстрагування, узагальнення, ідеалізація, індукція, аналогія та моделювання) у всіх виконаних в дисертаційній роботі дослідженнях та при розв'язку практичних задач.
2. Методи теорії імовірностей та математичної статистики для обробки даних втомних випробувань моделей зварних вузлів та для обробки даних замірів мікрогеометричних параметрів зварних швів.
3. Метод скінченних елементів, на якому базуються спеціальні програмні комплекси, для аналізу напружено-деформованого стану суднокорпусних вузлів.
4. Методи розв'язку нелінійних рівнянь при розв'язку задач оцінки втомної міцності суднокорпусного вузла, його проектування та визначення допустимого навантаження, а також в комп'ютерній програмі розв'язку задач втомної міцності суднокорпусних вузлів.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі удосконалено експериментально-теоретичний метод розрахунку втомної міцності суднокорпусних конструкцій. Удосконалений варіант методу на відміну від базового дозволяє виконувати розрахунки циклічної міцності зварних конструктивних вузлів корпусу судна в умовах нерегулярного зовнішнього навантаження, коефіцієнти концентрації напружень цих вузлів при цьому визначаються з певним рівнем забезпеченості, враховуючи локальну геометрію зварних швів.

В результаті досліджень отримано наступні наукові результати.

Вперше на основі базового варіанту експериментально-теоретичного методу, з урахуванням впливу на показники втомного основних факторів, розроблено критеріальні залежності для типового концентратора напружень, які дозволяють виконувати оцінку його втомної міцності не тільки при регулярному, а й стохастичному навантаженнях.

Вперше при визначенні теоретичного коефіцієнта концентрації напружень в конструктивних вузлах від стикових і кутових зварних швів запропоновано

використовувати величини радіусів і кутів нахилу профілю швів в місці переходу від основного металу до наплавленого, значення яких при заданому рівні забезпеченості встановлено на основі статистичної обробки великої серії опублікованих в літературі даних, з урахуванням виду зварювання, що дозволяє отримати результат без виконання натурних замірів цих величин.

Удосконалено метод визначення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень в зварному суднокорпусному вузлі як добутку таких коефіцієнтів від загальної геометрії і зварного шва при узагальнених значеннях його геометричних параметрів, що дозволяє суттєво спростити розрахунок і отримати результат із незначним завищенням величини такого коефіцієнта.

Отримала подальший розвиток класифікація методів розрахунку втомної міцності конструктивних вузлів за типом показника інтенсивності накопичення втомного пошкодження на основі аналізу існуючих в суднобудуванні методів, що дозволило встановити переваги і доцільність використання експериментально-теоретичного методу для вирішення різного типу практичних задач втомної міцності зварних конструктивних вузлів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено алгоритм оцінки втомної міцності типових осередків концентрації напружень при нерегулярному навантаженні з використанням гіпотези лінійного підсумовування втомних пошкоджень для навантаження з неперервним або ступінчастим розподілом.
2. Отримано параметри розподілу радіусів та кутів нахилу профілю стикових та кутових зварних швів для різних видів зварювання, які використовуються для визначення локального напружено-деформованого стану та концентрації напружень у зварних суднокорпусних вузлах.
3. На базі експериментально-теоретичного методу розроблено методики для розв'язку задач оцінки втомної міцності суднокорпусного вузла при регулярному і стохастичному навантаженні, а також проектування вузла та визначення параметрів допустимого навантаження за умови забезпечення заданого рівня втомної міцності. Вказані методики можуть бути застосовані на стадії проектування суден, а також для визначення залишкового ресурсу конструкцій суден, що експлуатуються.
4. Розроблено програмне забезпечення «ETM fatigue», яке дозволяє автоматизувати побудову кривих втоми суднокорпусних вузлів та розв'язок типових задач втомної міцності з використанням експериментально-теоретичного методу.

Практичне застосування результатів досліджень відображено у наступному:

1. «Практичні методики розв'язку задач втомної міцності конструктивних вузлів суднового корпусу за допомогою експериментально-теоретичного методу». УКФА 360032. Миколаїв: НУК, 2017. 53 с.
2. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 76716 Державної служби інтелектуальної власності України. Комп'ютерна програма «ETM fatigue» / Л.І. Коростильов, Д.Ю. Литвиненко. Дата реєстрації 08.02.2018.

Впровадження результатів. Результати наукових розробок впроваджено в навчальний процес при викладанні дисциплін студентам і аспірантам кораблебудівного навчально-наукового інституту за спеціальністю 135 – «Суднобудування» (акт від 28.09.2018).

Розроблені в роботі методики впроваджені у ТОВ «МАРІН ДИЗАЙН ІНЖИНІРІНГ МИКОЛАЇВ» (акт від 16.10.2018) для виконання оцінки втомної міцності суднокорпусних конструкцій.

Особистий внесок здобувача. Наведені у дисертації положення, всі отримані закономірності і висновки щодо удосконалення експериментально-теоретичного методу розроблені особисто здобувачем. У роботах, написаних у співавторстві, здобувачу належить: [1] – аналіз літературних джерел, виконання розрахунків, побудова кривих втоми, аналіз результатів; [2] – аналіз літературних джерел, обробка статистичних даних, аналіз результатів розрахунків; [3] – аналіз літературних джерел, виконання оцінки коефіцієнтів концентрації напружень серії зварних вузлів за допомогою скінченно-елементного аналізу та з використанням наближених залежностей, виконання порівняльного аналізу, аналіз результатів розрахунків; [4] – аналіз літературних джерел, аналіз застосовуваних на практиці методів оцінки втомної міцності і удосконалення їх класифікації; [6] – аналіз літературних джерел, розробка алгоритму оцінки втомної міцності типових осередків концентрації напружень при нерегулярному навантаженні, розробка варіантів удосконалення базових залежностей експериментально-теоретичного методу для врахування нерегулярності зовнішнього навантаження, порівняльний аналіз розроблених варіантів, аналіз результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи було представлено на 15 конференціях: III, V–VIII міжнародних науково-практичних конференціях «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, 2012, 2014–2017 рр.); II міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Миколаїв, 2012 р.); Всеукраїнських науково-технічних конференціях з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (м. Миколаїв, 2013, 2015–2018 рр.); XXIII Відкритій науково-технічній конференції молодих науковців і спеціалістів КМН-2013 «Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи» (м. Львів, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2016» (м. Херсон, 2016 р.); Міжнародній конференції «Інтеграція виробництва, освіти, інновацій та їх реалізація» (м. Харбін, КНР, 2018).

Публікації. Результати досліджень, що увійшли до дисертації, опубліковано у 24 наукових роботах (з них 5 одноосібно), зокрема: у наукових виданнях України – 5 статей [1–3], [6], [7] (з них 4 у фахових наукових виданнях, що входять в перелік МОН України); в міжнародних наукових профільних виданнях – 2 статті [4], [5]; у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій – 17 публікацій [8–23]; 1 свідоцтві про реєстрацію авторського права на твір [24].

Структура та обсяг дисертації. Робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, 5 додатків, списку використаних джерел із 162 найменувань. Основний обсяг дисертації міститься на 171 сторінках та включає 34 ілюстрації й 10 таблиць. Обсяг додатків складає 66 аркушів.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, наведено об'єкт, предмет та методи дослідження, показано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, представлено відомості про апробацію та опублікування результатів роботи, а також про її структуру та обсяг.

У **першому розділі** наведено розв'язок першої задачі дисертаційного дослідження. В ньому виконано аналіз існуючих методів розрахунку втомної міцності суднокорпусних вузлів. В результаті аналізу були виявлені їх недоліки і переваги та удосконалено існуючу класифікацію цих методів.

Відповідно до вказаної класифікації такі методи за типом показника інтенсивності накопичення втомного пошкодження можна поділити на наступні групи.

1) Силкові, до яких відносяться:

- а) методи, що засновані на використанні номінальних напружень (метод номінального напруження та ЕТМ, а також способи розрахунку на втому, які використовують ефективний коефіцієнт концентрації напружень),
- б) методи, що передбачають використання конструктивних напружень;

2) деформаційні;

3) енергетичні;

4) такі, що базуються на використанні понять механіки руйнування (коефіцієнта інтенсивності напружень в концентраторі, J -інтегралу Райса).

Метод номінального напруження потребує типізації досліджуваного району корпусу судна, де може з'явитися втомне пошкодження, у відповідності з класифікацією, що представлена у рекомендаціях класифікаційних товариств або міжнародних організацій із розрахунку втомної міцності зварних конструкцій. Після типізації критичних областей кожній такій області згідно вказаним рекомендаціям підбирається відповідна $S-N$ крива втоми, яка зв'язує розмах номінальних напружень $\Delta\sigma_n$ (Па) з числом N циклів до появи тріщини втоми.

Метод фіктивного закруглення концентратора напружень передбачає створення та аналіз скінченно-елементної моделі зварного вузла з фіктивним радіусом профілю шва в районі переходу від основного металу до наплавленого 1 мм. Після розрахунку максимальних головних напружень в такій моделі для визначення величини N використовується єдина крива втоми.

Метод напруження у «гарячій» точці передбачає визначення конструктивних напружень у зварному вузлі екстраполяцією напружень із спеціальних точок, положення яких регламентується відповідними рекомендаціями. При цьому використовується метод скінченних елементів або експериментальні методи. Дані напруження враховують ефекти макроконцентрації напружень (від загальної геометрії і форми вузла) і не враховують приріст напружень, обумовлений наявністю зварного шва.

Основою *деформаційного методу* розрахунку втомної міцності суднокорпусних вузлів є крива ε - N , яка пов'язує розмах повної деформації $\Delta\varepsilon$ з величиною N . Для опису такої кривої використовують деформаційний критерій втоми матеріалу Менсона

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' (2N)^c, \quad (1)$$

де E – модуль пружності матеріалу, Па; σ_f' (Па), ε_f' , b , c – величини, які визначають за допомогою втомних випробувань малих зразків або наближеними оцінками.

Розмах місцевих напружень і деформацій можна визначити за допомогою залежності Ремберга-Осгуда та формули Нейбера, які мають наступний вигляд:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'}; \quad (2)$$

$$K_\varepsilon K_\sigma = K_t^2, \quad (3)$$

де $\Delta\sigma$ – розмах напружень, Па; K' – коефіцієнт циклічного деформаційного зміцнення, Па; n' – показник ступені циклічного деформаційного зміцнення; K_σ , K_ε – коефіцієнти концентрації напружень та деформацій для пружно-пластичного стану; K_t – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень.

Середнє σ_m (Па) та максимальне σ_{max} (Па) напруження циклу при розрахунку на втому деформаційним методом враховують використовуючи залежності Морроу, Сміта-Уотсона-Топпера та Менсона-Хелфорда, які мають такий вигляд:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' (2N)^c; \quad (4)$$

$$\sigma_{max} \frac{\Delta\varepsilon}{2} E = (\sigma_f')^2 (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \varepsilon_f' E (2N_f)^{b+c}; \quad (5)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' \left(\frac{\sigma_f' - \sigma_m}{\sigma_f'} \right)^{c/b} (2N)^c. \quad (6)$$

Експериментально-теоретичний метод розрахунку втомної міцності суднокорпусних конструкцій було розроблено в НУК. В розділі зазначено його переваги у порівнянні з іншими методами. Зазначено про необхідність удосконалення методу для його практичного застосування.

Основні наукові результати розділу опубліковано у роботах [1, 4, 9, 10, 21].

У другому розділі дисертації обґрунтовано напрям досліджень та перелічено основні методи виконання роботи.

1. Загальнонаукові методи та прийоми дослідження (формалізація, гіпотетико-дедуктивний метод, аналіз та синтез, абстрагування, узагальнення, ідеалізація, індукція, аналогія та моделювання) застосовувались у всіх виконаних в дисертаційній роботі дослідженнях та при розв'язку практичних задач.
2. Методи теорії імовірностей та математичної статистики використовувались для опрацювання даних втомних випробувань моделей зварних вузлів та для опрацювання даних замірів мікрогеометричних параметрів зварних швів.
3. Метод скінченних елементів, на якому базуються спеціальні програмні комплекси, застосовувався для аналізу напружено-деформованого стану суднокорпусних вузлів.

4. Методи розв'язку нелінійних рівнянь використовувались при отриманні розв'язку задачі оцінки втомної міцності суднокорпусного вузла, його проектування та визначення допустимого навантаження, а також при розробці відповідної комп'ютерної програми.

Прикладні програми, що використовувались у дослідженнях, включають пакети FreeCAD, Salome-Meca, CalculiX, Python, Apache OpenOffice та Embarcadero Delphi.

У *третьому розділі* розв'язано задачі 2–4 дисертаційного дослідження, які стосувались удосконалення ЕТМ.

У розділі коротко описано базовий варіант методу, основним елементом якого є крива втоми типового осередку концентрації напружень. Приклад такого осередку у конструктивному вузлі, який є складовою суднового перекриття, наведено на рис. 1.

Ця крива складається з трьох ділянок і будується на базі критеріальних залежностей втоми матеріалу Ленджера (для ділянки II) та Хейвуда (для ділянки III) з використанням експериментальних даних випробувань на втому натурних або напівнатурних моделей. Така крива втоми представлена на рис. 2 в системі координат $n = \lg N$ та $\bar{\sigma}_H = \Delta\sigma_H/\Delta\sigma_{H0}$.

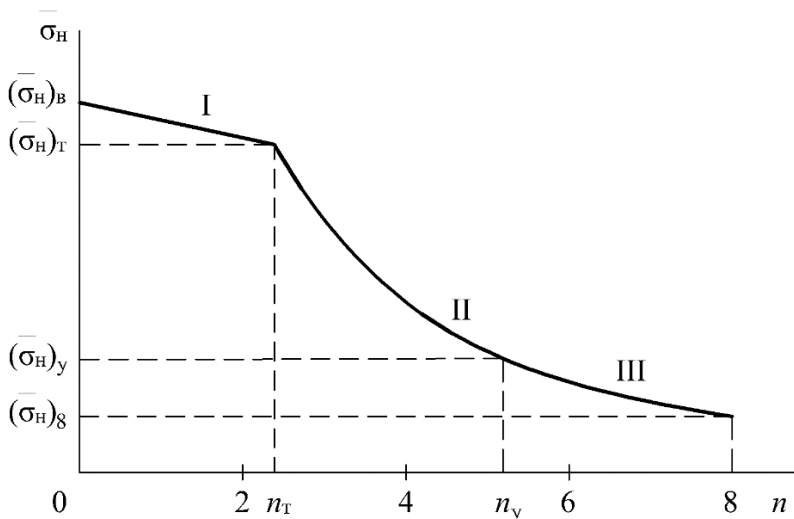


Рисунок 2 – Крива втоми за експериментально-теоретичним методом

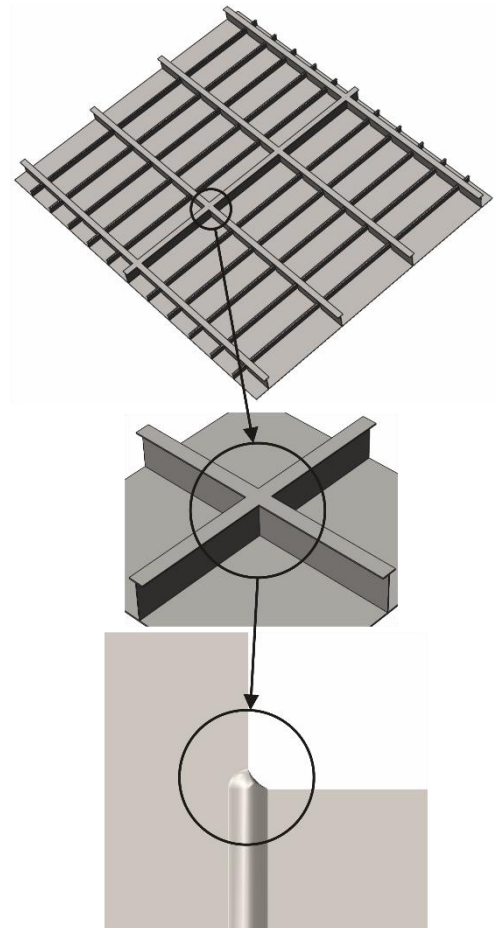


Рисунок 1 – Типовий осередок концентрації у судновому перекритті

При побудові кривих втоми «прив'язка» до результатів циклічних випробувань проводиться на ділянці II в точці з абсцисою $n_0 = \lg N_0$. Індекс «0» при $\Delta\sigma_{H0}$ та n_0 означає, що вказані величини відносяться до експериментальних даних.

Базовий варіант ЕТМ призначено для розв'язання типових задач втомної міцності суднокорпусних вузлів при навантаженні регулярного характеру. Розрахункові залежності для кожної ділянки кривої мають наступний вигляд ¹:

– для ділянки I

$$\bar{\sigma}_H = \left(1 - \frac{n}{B}\right)(\bar{\sigma}_H)_B; \quad (7)$$

¹ Коростылёв Л.И. Оценка усталостной прочности судовых корпусных конструкций с концентраторами напряжений. *Тр. Второй междунар. конф. по судостроению. ISC'98. Секция С.* (Санкт-Петербург, 24–26 ноября 1998 г.). Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1998. С. 160–167.

– для ділянки II

$$\bar{\sigma}_H = \left\{ \frac{1 + \bar{\psi}/10^{0,5n}}{\phi[1 + \bar{\psi}/10^{0,5n_0}]} \right\}^{1/s}; \quad (8)$$

– для ділянки III

$$\bar{\sigma}_H = \bar{\sigma}_B \left[\frac{2(1 + \beta n^4)}{1 + \alpha n^4} - \delta(n - n_y) \right]. \quad (9)$$

У формулах (7)–(9) використано такі позначення:

$$\left. \begin{aligned} (\bar{\sigma}_H)_B &= \frac{\bar{\sigma}_B}{0,5 + |r_{mH}|}; \quad (\bar{\sigma}_H)_T = \frac{\bar{\sigma}_T}{0,5 + |r_{mH}|}; \\ (\bar{\sigma}_H)_y &= \left\{ \frac{1 + (\bar{\psi}/N_y^{0,5})}{\phi[1 + (\bar{\psi}/N_0^{0,5})]} \right\}^{1/s}; \quad (\bar{\sigma}_H)_8 = \bar{\sigma}_B \left[\frac{2(1 + \beta 8^4)}{1 + \alpha 8^4} - \delta(8 - n_y) \right]; \\ N_T &= \left\{ \frac{\bar{\psi}}{\phi[1 + \bar{\psi}/N_0^{0,5}][(\bar{\sigma}_H)_T]^s - 1} \right\}^2; \quad N_y = \left\{ \frac{\bar{\psi}}{2,5(\sigma_T/\sigma_B) - 1} \right\}^2; \\ n_0 &= \lg N_0; \quad n_y = \lg N_y; \quad n_T = \lg N_T; \\ \bar{\sigma}_B &= \frac{\sigma_B}{\sigma_{H0}}; \quad \bar{\sigma}_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{H0}}; \quad B = \frac{n_T}{1 - (\sigma_T/\sigma_B)}; \\ r_{mH} &= \frac{\sigma_{mH}}{\sigma_H}; \quad \bar{\psi} = 0,625 \frac{E}{\sigma_B} \ln \frac{1}{1 - \psi_K}; \\ s &= \frac{2}{1 + m}; \quad Q = \frac{2\bar{\sigma}_B}{(\bar{\sigma}_H)_y}; \quad \delta = \frac{r_{mH}(2\beta/\alpha)^2}{(8 - n_y)[1 + r_{mH}(2\beta/\alpha)]}; \\ \alpha &= \beta Q + \frac{Q - 1}{n_y^4}; \quad \beta = \frac{0,0038}{3K_t}; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

(11)

де $(\bar{\sigma}_H)_B$, $(\bar{\sigma}_H)_T$, n_T , $(\bar{\sigma}_H)_y$, n_y , $(\bar{\sigma}_H)_8$ – ординати та абсциси граничних точок ділянок кривої втоми (див. рис. 2); m – показник степені при степеневій апроксимації діаграми деформування матеріалу; β – коефіцієнт, що враховує концентрацію напружень у вузлі; ϕ – функція, яка враховує відмінності геометричних та механічних характеристик досліджуваного вузла та моделі, що випробовувалась на втому; σ_B , σ_T – границі міцності та плинності матеріалу вузла, Па; ψ_K – відносне звуження після розриву матеріалу вузла.

Удосконалення експериментально-теоретичного методу для оцінки втомної міцності суднокорпусних вузлів при стохастичному навантаженні. Для інженерних розрахунків необхідно мати залежності, що дозволяють здійснювати оцінку циклічної міцності вузлів корпусу судна при стохастичному навантаженні на базі характеристик втомної міцності, отриманих в результаті лабораторних випробувань моделей вузлів при регулярному навантаженні. Найбільш використовуваною на практиці такою залежністю є лінійна гіпотеза підсумовування втомних пошкоджень Пальмгрена-Майнера, хоча до теперішнього часу розроблено ряд інших, в тому числі нелінійних. Ця гіпотеза для навантаження із ступінчастим довготерміновим розподілом представляється у такому вигляді:

$$D = \sum_{i=1}^q n_i / N_i, \quad (12)$$

де D – величина міри втомного пошкодження; q – кількість ступенів навантаження; n_i – напрацьоване число циклів зовнішнього навантаження на i -тій ступені з амплітудою циклу напружень $(\sigma_a)_i$; N_i – число циклів до зародження тріщини при регулярному навантаженні вузла амплітудою $(\sigma_a)_i$.

У випадку, коли є відомим неперервний закон довготермінового розподілу зовнішнього навантаження, лінійна гіпотеза описується формулою

$$D = N^* \int_{(\Delta\sigma_n)_{\min}}^{(\Delta\sigma_n)_{\max}} \frac{p(\Delta\sigma_n)}{N(\Delta\sigma_n)} d(\Delta\sigma_n), \quad (13)$$

де $p(\Delta\sigma_n)$ – щільність імовірності розподілу величини $\Delta\sigma_n$; $N(\Delta\sigma_n)$ – залежність числа циклів до появи тріщини втоми від величини $\Delta\sigma_n$; $(\Delta\sigma_n)_{\min}$, $(\Delta\sigma_n)_{\max}$ – мінімальний та максимальний розмахи номінальних напружень в діапазоні навантаження досліджуваного об'єкту, Па; N^* – число циклів навантаження за строк експлуатації.

Залежності (12), (13) є лінійними, хоча в дійсності накопичення втомного пошкодження відбувається нелінійно. Ця гіпотеза не враховує ряд факторів, таких як зміна циклічних характеристик матеріалу протягом накопичення втомного пошкодження, ефект послідовності ступенів навантаження з різною амплітудою $(\sigma_a)_i$, а також пошкоджуючий ефект циклів з максимальним напруженням нижче границі витривалості. Для врахування останнього в оцінках втомної довговічності при нерегулярному навантаженні можна обмежитись деякою нижньою границею пошкоджуючих напружень. Вказану границю можна визначати множенням коефіцієнту нижньої границі пошкоджуючих напружень ζ ($\zeta \approx 0,5$) на границю витривалості розглядуваного об'єкта при симетричному циклі $\zeta\sigma_{-1k}$.

Деформаційний критерій втоми матеріалу з поправкою на нерегулярність навантаження можна представити у вигляді ²

$$\Delta\epsilon = \bar{C} N^{-\bar{\alpha}} + \frac{2\zeta\sigma_{-1}}{E}. \quad (14)$$

де $\bar{C}$, $\bar{\alpha}$ – величини, що визначаються за результатами циклічних випробувань гладких зразків або наближеними оцінками.

Рівняння (14) представляє собою спрощений варіант деформаційного критерію втоми матеріалу (1). Залежність (14) отримана виходячи з того, що при числі циклів $N = 10^7$ розмах деформації $\Delta\epsilon$ повинен наближуватись до $2\zeta\sigma_{-1}/E$.

У дисертаційній роботі було розглянуто наступні варіанти модифікування розрахункових залежностей ЕТМ.

- 1) Заміна критерію Ленджера, на якому базуються залежності малоциклової ділянки II, його модифікованим варіантом (14).
- 2) Введення поправки на нерегулярність навантаження лише для багатоциклової ділянки III шляхом плавного пониження кривої втоми на ній у порівнянні з базовою так, щоб при $N = 10^7$ відносний розмах напружень за модифікованою кривою $(\bar{\sigma}_n')_7$ визначався добутком базової величини $(\bar{\sigma}_n)_7$ на коефіцієнт ζ .
- 3) Одночасне введення поправок до базових розрахункових залежностей методу на ділянці II згідно варіанту 1 і на ділянці III згідно варіанту 2.

² Гучинский Р.В., Петинов С.В. Разработка узла конструкции судна по условию усталостной долговечности. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Санкт-Петербург, 2012. № 159. С. 177–186.

При всіх викладених варіантах модифікування базових залежностей методу критичне значення міри втомного пошкодження $D_{кр}$ приймається рівним одиниці.

Розрахункові залежності варіанту 3 модифікування ЕТМ отримують заміною у (8), (10), (11) величини $\bar{\psi}$ коригованою $\bar{\psi}'$. Остання визначається формулою

$$\bar{\psi}' = 0,625 \frac{E}{\sigma_B} \ln \left(\frac{1}{1 - \psi_k} \right) \frac{1}{\zeta}. \quad (15)$$

Залежність для побудови ділянки III такої кривої втоми має наступний вигляд:

$$\bar{\sigma}_H' = \bar{\sigma}_B \left[\frac{2(1 + \beta n^4)}{1 + \alpha n^4} \left(\frac{1}{n - n_y} + \frac{\zeta - 1}{8 - n_y} \right) - \delta' \right] (n - n_y), \quad (16)$$

де $\bar{\sigma}_B$ та β визначаються так само, як і у випадку базових залежностей (11).

Величина n'_y у (16), яка є абсцисою граничної точки ділянки II коригованої кривої втоми, розраховується з використанням таких залежностей:

$$n'_y = \lg N'_y; \quad N'_y = \left(\bar{\psi}' / \frac{2,5}{\zeta} \cdot \frac{\sigma_T}{\sigma_B} - 1 \right)^2. \quad (17)$$

Інші ж величини в (16) визначаються, відповідно, за формулами

$$\alpha' = \beta Q' + \frac{Q' - 1}{(n'_y)^4}; \quad \delta' = \zeta^2 \frac{r_{mn} (2\beta/\alpha')^2}{(8 - n'_y) \cdot [1 + r_{mn} \cdot \zeta \cdot (2\beta/\alpha')]}; \quad Q' = \frac{2\bar{\sigma}_B}{(\bar{\sigma}_H')_y}, \quad (18)$$

де $(\bar{\sigma}_H')_y$ – ордината граничної точки ділянки II кривої втоми за 3 варіантом модифікування методу, яку отримують з підстановки величини $\bar{\psi}'$ у (11).

Вказані варіанти досліджувались на прикладі вузла перетину поясів рівновисоких балок, схема якого представлена на рис. 3. Даний вузол було виготовлено у виробничих умовах і випробувано на втому в лабораторії кафедри будівельної механіки корабля НУК³. Теоретичний коефіцієнт концентрації вузла K_t для ймовірності втомного руйнування $P_f = 50\%$ складав 4,02, а при $P_f = 2,3\%$ $K_t = 6,20$. Ці значення було отримано з використанням методики, яка наведена у розділі 4.

Результати розрахунків втомного пошкодження вузла за трьома варіантами модифікування залежностей ЕТМ, а також згідно базовим залежностям методу представлено для $P_f = 2,3\%$ в табл. 1.

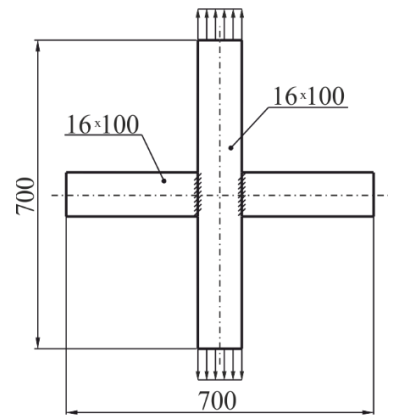


Рисунок 3 – Схема вузла

Таблиця 1 – Результати розрахунків втомного пошкодження суднокорпусного вузла при різних варіантах удосконалення експериментально-теоретичного методу

Варіант модифікування	Ділянки кривої втоми, які коригувались	Коефіцієнт ζ	$(\bar{\sigma}_H')_7/(\bar{\sigma}_H)_7$	$(\bar{\sigma}_H)_8$, МПа	D
Базова крива	–	–	–	47,05	3,94
1	II	0,55	0,78	36,44	10,80
2	III	–	0,52	14,20	11,89
3	II, III	0,55	0,52	20,10	20,32

³ Коростильов Л.І. Утомна довговічність конструктивних вузлів з концентраторами різних типів. Збірник наукових праць Українського державного морського технічного університету. Миколаїв, 2002. №1 (379). С. 13–22.

Циклічна міцність вузла досліджувалась виходячи з того, що на ного діє стохастичне навантаження, розподілене за двохпараметричним законом Вейбулла. Відповідно до останнього щільність розподілу розмахів номінальних напружень визначається наступною формулою:

$$p(\Delta\sigma_n) = \hat{k} \left(\Delta\sigma_n^{\hat{k}-1} / a_\sigma^{\hat{k}} \right) \exp \left(-(\Delta\sigma_n / a_\sigma)^{\hat{k}} \right), \quad (19)$$

де $\hat{k}$ – параметр форми; a_σ – параметр масштабу розподілу, Па. В розрахунках прийнято: $\hat{k} = 0,93$; $a_\sigma = 18,55$ МПа; загальне число циклів навантаження $N^* = 8,89 \cdot 10^7$. Наведені значення було отримано розрахунковим шляхом у звіті SSC-398 (Ship Structure Committee).

Криві втоми досліджуваного вузла, побудовані з використанням ЕТМ за варіантами його модифікування 1, 2, 3 для $P_f = 2,3\%$ представлено на рис. 4, де значками «X» та «+» позначені результати циклічних випробувань вузла.

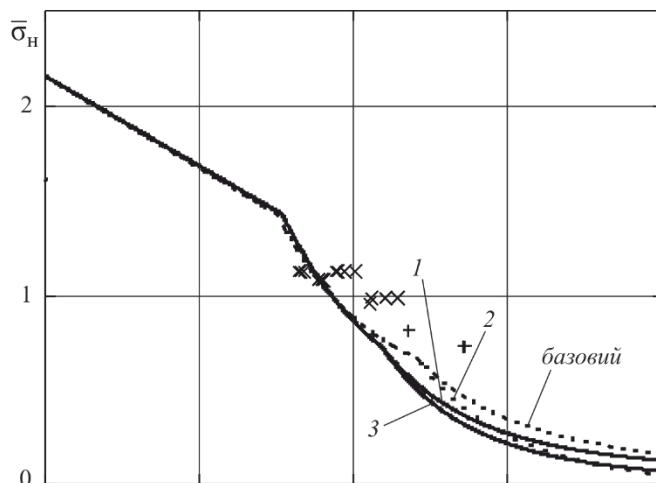


Рисунок 4 – Криві втоми суднокорпусного вузла

Результати розрахунку втомного пошкодження D досліджуваного вузла, отримані методами, що рекомендуються Міжнародним інститутом зварювання (IIW), DNV-GL та Міжнародною асоціацією класифікаційних товариств для розрахунку утомної міцності зварних конструкцій, представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Величини втомного пошкодження конструктивного вузла, визначені за допомогою основних практичних методів при ймовірності руйнування 2,3%

Метод розрахунку	$(\Delta\sigma_n)_8$, МПа	D
Номінального напруження (відповідно до рекомендацій IIW 2008 р., FAT50)	18,46	18,07
Номінального напруження (відповідно до рекомендацій IIW 2003 р., FAT50)	20,24	18,07
Напруження в «гарячій» точці (відповідно до рекомендацій IIW 2003 р., FAT100)	19,65	19,29
Фіктивного закруглення концентратора напружень (відповідно до рекомендацій IIW 2003 р., FAT225)	22,77	12,17

Як видно з результатів, представлених у табл. 1 і 2, найбільш близьким до даних розрахунків методами, переліченими в табл. 2, є результат, отриманий за варіантом 3 модифікування експериментально-теоретичного методу.

На рис. 5 в напівлогарифмічних координатах представлено базову та модифіковану за вибраним варіантом криві втоми ЕТМ в порівнянні з кривими втоми інших основних практичних методів для вузла, зображеного на рис. 3, при $P_f = 2,3\%$: 1 – за методом фіктивного закруглення концентратора напружень; 2 – за

модифікованим відповідно до варіанту 3 експериментально-теоретичним методом при $\zeta = 0,55$; 3 – за методом напруження в «гарячій» точці; 4 – за методом номінального напруження.

Як видно, має місце близькість між кривими втоми, побудованими за модифікованим ЕТМ та іншими основними практичними методами.

Також було виконано порівняння кривих інтенсивності накопичення втомного пошкодження, побудованих на основі кривих втоми, наведених на рис. 5.

Дослідження впливу середніх напружень циклу на критеріальні залежності втоми типових концентраторів зварних конструктивних вузлів. Корпус судна протягом строку експлуатації крім дії змінного навантаження зазнає статично-змінне навантаження, обумовлене наявністю вантажів та баласту. Середні напруження циклу, що обумовлені згином корпусу судна на тихій воді, можуть підсилювати пошкодуючу дію змінних напружень.

Експериментально-теоретичний метод розрахунку втомної міцності суднокорпусних конструкцій дозволяє будувати криві втоми з урахуванням величини середніх номінальних напружень циклу в області високої довговічності. Проте, при побудові малоциклової ділянки II такої кривої передбачається, що в концентраторі реалізується режим «жорсткого» малоциклового навантаження з контрольованим розмахом деформації і вплив середньої деформації циклу на довговічність вузла, таким чином, не враховується.

Для врахування середніх σ_m або максимальних σ_{max} напружень циклу при побудові кривої втоми на малоцикловій ділянці II необхідно замінити критерій Ленджера в ЕТМ формулою Морроу (4), Сміта-Уотсона-Топера (5), Менсона-Хелфорда (6) або модифікованими залежностями Сміта-Уотсона-Топпера. При цьому можна припустити, що величини розмахів повних локальних деформацій $\Delta \varepsilon$ та напружень $\Delta \sigma$ не залежать від σ_m , σ_{max} аналогічно деформаційному методу.

Для визначення параметрів локального циклу напружень-деформацій доцільно використовувати формулу Нейбера (3). Циклічну криву матеріалу, яка пов'язує амплітуди деформацій та напружень, необхідно апроксимувати з використанням залежності Ремберга-Осгуда (2) з наближено визначеними параметрами. Крім того, враховуючи, що суднокорпусні матеріали відносяться до циклічно стабільних, циклічна крива таких матеріалів може бути наближено замінена монотонною кривою напруження-деформації σ - ε . При цьому можна застосовувати лінійну або степеневу її апроксимацію.

Параметри апроксимації циклічної кривої матеріалу формулою Ремберга-Осгуда K' , n' пов'язані з коефіцієнтами σ_f' , ε_f' , b , c у (1), (4)–(6). Величини σ_f' , ε_f' , b , c можуть

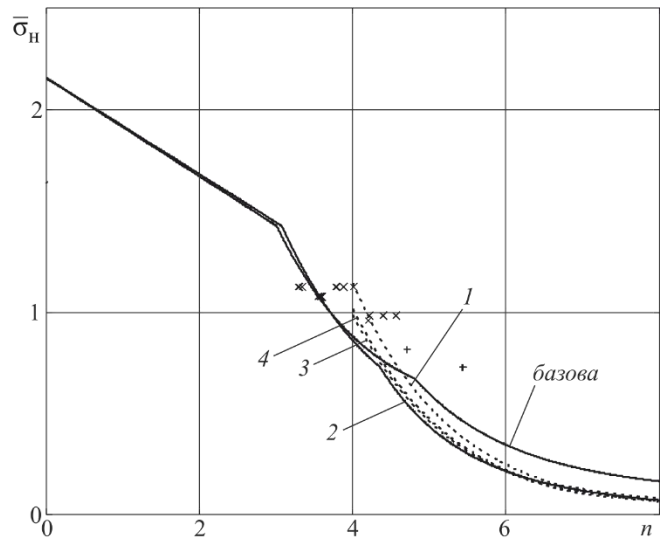
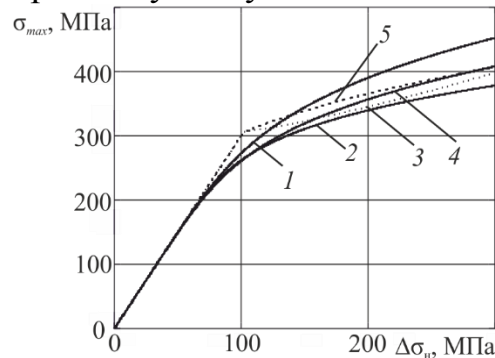


Рисунок 5 – Порівняння кривих втоми за різними методами

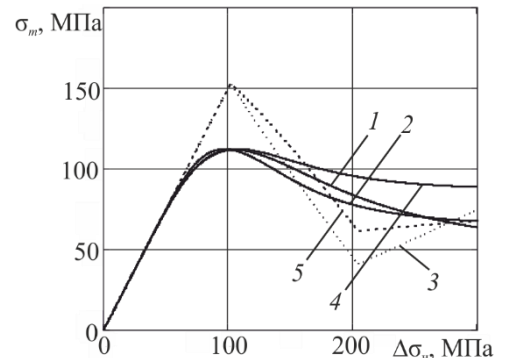
бути наближено розраховані на базі механічних характеристик матеріалу, які отримують при його монотонному навантаженні, з використанням усередненого методу та методу Муралідхарана-Менсона.

Для вибору найбільш прийняттого способу визначення σ_{max} та σ_m для локального циклу розглядався умовний концентратор напружень (ефективний коефіцієнт концентрації $K_e = 3$) при дії на нього зовнішнього навантаження із віднульовою асиметрією циклу, матеріал – суднобудівна сталь 09Г2.

Результати розрахунку середніх і максимальних напружень локального циклу представлені у вигляді кривих $\sigma_{max}(\Delta\sigma_n)$ та $\sigma_m(\Delta\sigma_n)$, відповідно, на рис. 6, а та б. При цьому використані наступні позначення



а



б

Рис. 6 – Параметри усталеного локального циклу напружень-деформацій для умовного концентратора

для відповідних залежностей: 1 – отримані за допомогою циклічних кривих матеріалу, апроксимованих формулою Рамберга-Осгуда (2) з параметрами, наближено визначеними методом Муралідхарана-Менсона; 2 – розраховані з використанням формули Рамберга-Осгуда, що апроксимує експериментальні дані; 3 – визначені за допомогою лінійної апроксимації монотонної кривої напруження-деформації σ - ϵ матеріалу; 4 – аналогічно 1, проте коефіцієнти формули Рамберга-Осгуда розраховувались усередненим методом; 5 – визначені за допомогою степеневі апроксимації монотонної кривої напруження-деформації σ - ϵ матеріалу.

З рис. 6, а видно, що функції $\sigma_{max}(\Delta\sigma_n)$, визначені за допомогою отриманих розрахунковим шляхом монотонних та циклічних кривих матеріалу, які наведені на рисунку у вигляді кривих 1 та 3–5, незначно розрізняються між собою та узгоджуються із кривою 2, що була побудована на базі експериментальних даних.

Криві 3 та 5 на рис. 6, б, отримані за допомогою лінійної та степеневі апроксимацій монотонної кривої σ - ϵ , мали суттєві якісні і кількісні відмінності від кривої 2, побудованої з використанням залежності Рамберга-Осгуда з параметри на базі експериментальних даних. Криві $\sigma_m(\Delta\sigma_n)$, отримані за допомогою апроксимації циклічної кривої залежністю Рамберга-Осгуда з наближено визначеними коефіцієнтами, мали також відмінності від кривої $\sigma_m(\Delta\sigma_n)$, побудованої за експериментальними даними. Проте, відмінності від експериментальної кривої при застосуванні формули Рамберга-Осгуда були меншими.

Об'єктом досліджень, для котрого будувались криві втоми ЕТМ з урахуванням середніх напружень циклу на ділянці II кривої та без їх врахування, було вибрано вузол перетину поясків рівновисоких балок (рис. 7). Даний вузол був виготовлений у виробничих умовах та випробовуваний на втому в лабораторії кафедри будівельної механіки корабля НУК⁴. Для ймовірності втомного руйнування 50 %

⁴ Коростылев Л.И. Усталостная прочность узлов пересечения поясков равновысоких балок судового корпуса. Конструкция и строительная механика корабля: сб. научн. тр. Николаев, 1989. С. 62–67.

величина теоретичного коефіцієнта концентрації вузла $K_{t0} = 2,28$. Це значення було отримано із застосування скінченно-елементного аналізу.

Криві втоми при навантаженні постійної амплітуди для ймовірності втомного руйнування суднокорпусного вузла $P_f = 50\%$ за базовим варіантом ЕТМ, а також з урахуванням середніх напружень циклу на ділянці II, отримані різними способами, разом з експериментальними даними наведені на рис. 8. На останньому представлені наступні модифікації кривих втоми: 1 – побудована за допомогою залежності Менсона-Хелфорда (6), формули Нейбера (3) та залежності Рамберга-Осгуда (2), з розрахованими усередненим методом параметрами; 2 – отримана з використанням залежності Сміта-Уотсона-

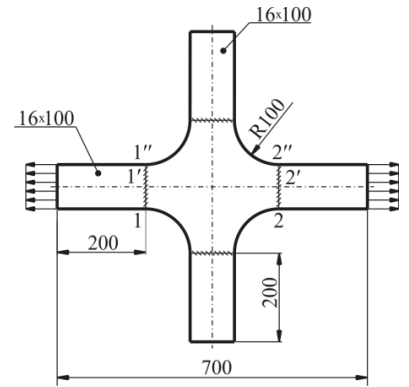
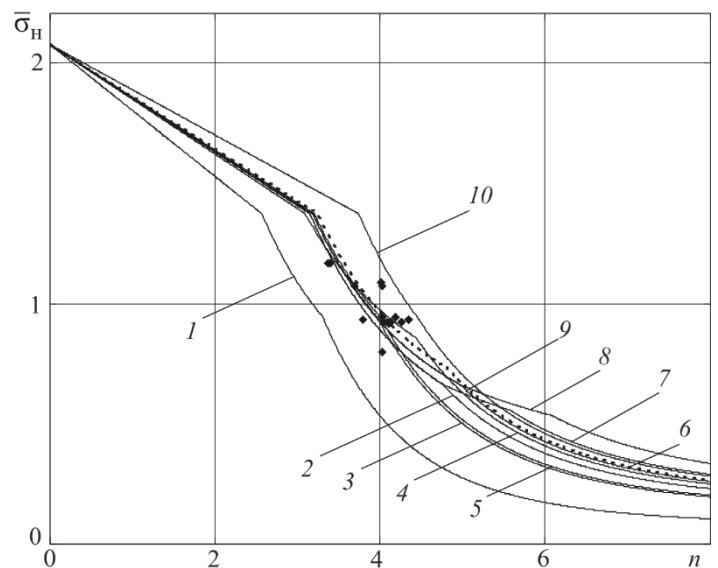


Рисунок 7 – Схема вузла

Топпера (5) та для розрахунку величини σ_{max} – степеневій апроксимації монотонної кривої σ - ϵ й формули Нейбера; 3 – така ж, як 1, але з використанням формули Сміта-Уотсона-Топпера (5); 4 – крива, побудована за базовими залежностями методу, але з використанням формули (1) замість критерія Ленджера, з експериментальними коефіцієнтами

для сталі категорії D40; 5 – така ж, як 1, але з використанням модифікованої залежності (5); 6 – отримана за базовими залежностями методу; 7 – така ж, що й 2, але в даному випадку координати точки початку пружного деформування $(\bar{\sigma}_n)_y$, n_y кривої втоми визначались виходячи з підстановки в деформаційний критерій втоми матеріалу розмаху пружної деформації в концентраторі $\Delta\epsilon = \sigma_T / [(r_{mn} + 0,5)E]$ при максимальних напруженнях локального циклу $\sigma_{max} = \sigma_T$ та асиметрії циклу зовнішнього навантаження $r_{mn} = \sigma_{mn} / \Delta\sigma_n$, а також з використанням



◆ – Експериментальні дані

Рисунок 8 – Криві втоми суднокорпусного вузла на рис. 6

ступеневої апроксимації монотонної кривої σ - ϵ ; 8 – така ж, що й 7, однак в даному випадку використовувалась модифікована формула (5); 9 – така ж, як 2, але з використанням модифікованої формули (5); 10 – побудована за допомогою залежності Морроу (4).

Як видно з рис. 8, більшість кривих втоми практично зливались в одну в області малоциклової ділянки II. Значні відхилення мали криві втоми 1 та 10, модифіковані, відповідно, з використанням залежностей Менсона-Хелфорда та Морроу.

Основні наукові результати розділу наведені у роботах [5, 6, 13, 14, 15, 17, 22].

У четвертому розділі дисертації представлено результати досліджень, що стосувались практичної реалізації експериментально-теоретичного методу, які є розв'язком задач 5 та 6 дисертаційного дослідження.

Аналіз величин мікрогеометричних параметрів зварних швів різних типів. Міцність суднокорпусних вузлів при змінному навантаженні в значній мірі залежить від рівня концентрації напружень. Кут нахилу профілю шва Θ (град) в місці переходу від основного металу до металу шва і радіус переходу ρ (мм) в даному місці є одними з основних параметрів, що визначають рівень концентрації напружень у зварних конструктивних вузлах. Геометричні параметри стикового зварного шва наведені на рис. 9.

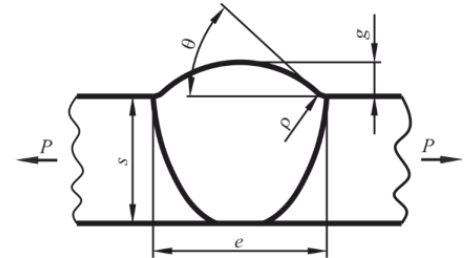


Рисунок 9 – Геометричні параметри зварного стикового шва

Наявні в літературі дані замірів вказаних параметрів у швах для різних типів зварювання були зібрані в узагальнені вибірки та оброблені статистично. Основні результати наведені в табл. 4.

Було встановлено, що величини ρ і Θ розподілені за логнормальним законом

$$f(\rho) = \frac{0,4343}{\sigma_{\lg \rho} \rho \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg \rho - \lg \rho_0)^2}{2\sigma_{\lg \rho}^2}}, \quad (20)$$

де $\sigma_{\lg \rho}$ – незміщена оцінка дисперсії логарифмованої випадкової величини $\lg \rho$, розподіленої за нормальним законом; $\lg \rho_0$ – оцінка математичного сподівання величини $\lg \rho$. Розподіл величини Θ описується аналогічною до (20) формулою.

Таблиця 4 – Параметри логнормального розподілу, математичні сподівання і стандартні відхилення величин ρ та Θ для зварних швів

Тип зварювання	$\lg \rho_0$	$\sigma_{\lg \rho}$	$\lg \Theta_0$	$\sigma_{\lg \Theta}$	M_ρ , мм	σ_ρ , мм	M_Θ , град	σ_Θ , град
Стикові шви								
Ручне дугове	$-7,76 \cdot 10^{-3}$	0,47	1,39	0,26	1,77	2,64	29,28	18,91
В середовищі CO ₂	-0,67	0,28	1,59	0,15	0,26	0,19	41,32	14,93
Під шаром флюсу	–	–	–	–	0,67	0,76	45	11,2
Кутові шви								
Ручне дугове	-0,29	0,36	2,15	0,04	0,72	0,72	141,49	14,34
В середовищі CO ₂ (усереднені дані)	–	–	–	–	1,16	–	140,33	–
Під шаром флюсу	–	–	–	–	0,5	0,3	146	14

За результатами статистичної обробки даних замірів величин ρ і Θ були побудовані гістограми та криві, що їх вирівнюють. Теоретичні розподіли перевірялись на відповідність експериментальним даним за критеріями Пірсона,

Андерсона-Дарлінга та Колмогорова-Смірнова. Таким чином, були визначені параметри логнормальних розподілів $\lg \rho_0$, $\lg \Theta_0$, $\sigma_{\lg \rho}$, $\sigma_{\lg \Theta}$, математичні сподівання M_ρ , M_Θ та стандартні відхилення σ_ρ , σ_Θ величин радіусів та кутів нахилу в місці переходу від основного металу до наплавленого для стикових швів та кутових швів, виконаних ручним дуговим зварюванням. Також отримані результати для стикових швів, виконаних зварюванням в середовищі вуглекислого газу. Крім того, представлені результати, наявні в літературі для кутових швів, вироблених зварюванням в середовищі CO_2 та для стикових і кутових швів, виконаних зварюванням під шаром флюсу.

Гістограма та крива, що її вирівнює, для величини ρ у стикових швах, виконаних ручним дуговим зварюванням, представлена на рис. 10.

Наближений метод визначення величин теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень зварних суднокорпусних вузлів. Розрахунок теоретичного коефіцієнта концентрації напружень для вузла корпусу судна є одним з етапів розрахунку його втомної міцності за допомогою ЕТМ.

Створення детальної геометричної моделі зварного суднокорпусного вузла у CAD-системі, з урахуванням моделювання форми зварного шва, та її аналіз у програмних комплексах методом скінчених елементів може бути достатньо трудомістким.

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень K_t для зварного вузла без дефектів можна представити у вигляді добутку

$$K_t = K_g \cdot K_w, \quad (21)$$

де K_w – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, обумовлений наявністю зварного шва; K_g – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, обумовлений загальною геометрією вузла.

Перевірка справедливості формули (21) виконана на хрестоподібному зварному з'єднанні та вузлі перетину поясків рівновисоких балок.

Для хрестоподібного з'єднання з кутовими швами в табл. 5 наведені результати порівняння величин K_t , розрахованих з використанням деталізованої моделі вузла та методу скінчених елементів і отриманих із застосуванням (21).

Таблиця 5 – Порівняння коефіцієнтів концентрації напружень, розрахованих за допомогою деталізованої моделі вузла та залежності (21) при $\Theta = 45$ град

ρ , мм	K_t	K_w	K_g	$K_g \cdot K_w$	$\bar{\delta}$, %
2,30	2,02	1,65	1,35	2,23	10,4
1,50	2,31	1,86	1,35	2,51	8,66
0,71	2,92	2,28	1,35	3,08	5,65
0,52	3,21	2,50	1,35	3,38	5,12

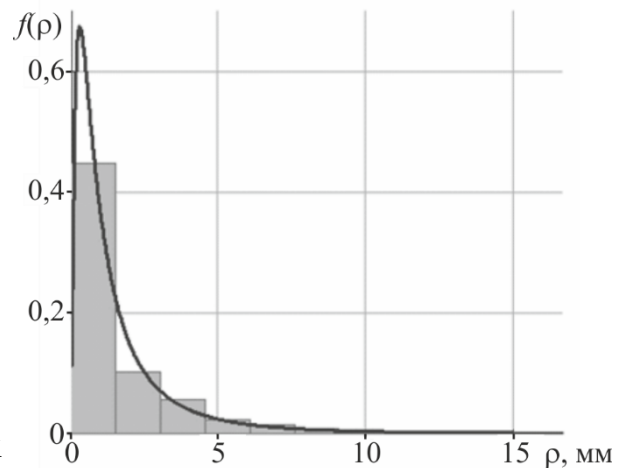


Рисунок 10 – Гістограма та крива, що її вирівнює

Для визначення величин K_w , представлених у табл. 5, застосовувались умовні стикові шви, значення параметрів ρ і Θ яких відповідали таким самим у досліджуваному вузлі. Інші розмірні параметри таких швів підбирались за ГОСТ 5264-80.

Результати визначення графіку зміни теоретичного коефіцієнту концентрації напружень вздовж ліній 1-1' або 1''-1', 2-2' або 2''-2' для вузла, схема якого наведена на рис. 7, представлено на рис. 11. На цьому рисунку використані наступні позначення: 1 – графік зміни K_t , побудований з використанням методу скінченних елементів; 2 – графік зміни K_t отриманий за (21); x – відстань від кромки вузла вдовж відповідних ліній 1-1' або 1''-1', 2-2' або 2''-2'.

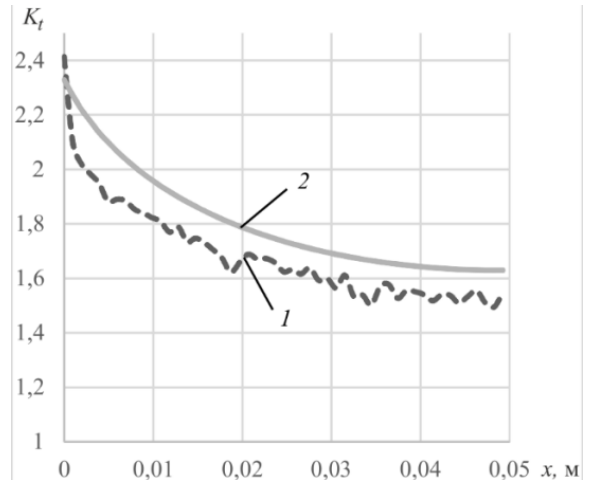


Рисунок 11 – Зміна коефіцієнту концентрації напружень у вузлі

Практичні методи розв'язку задач втомної міцності при стохастичному навантаженні за допомогою експериментально-теоретичного методу. На практиці виникають наступні задачі: перевірка втомної міцності суднокорпусного вузла; визначення допустимого коефіцієнту концентрації напружень для суднокорпусного вузла за умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності; визначення допустимого параметру зовнішнього навантаження на конструктивний вузол з тієї ж умови.

Першим етапом розв'язку усіх задач є підготовка вихідних даних, яка включає наступні кроки: розрахунок теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень K_t та K_{t0} для досліджуваного вузла та його моделі; визначення точки «прив'язки» до результатів втомних випробувань типового осередку концентрації напружень $\Delta\sigma_{H0}$, N_0 за допомогою статистичної обробки результатів втомних випробувань моделі вузла; визначення параметрів інтенсивності зовнішнього навантаження.

Величини розмахів номінальних напружень $\Delta\sigma_H$ на границях вузла у всіх задачах передбачаються розподіленими за лінійним законом або законом Вейбулла (19).

Задача оцінки втомної міцності суднокорпусного вузла при стохастичному навантаженні розв'язується з використанням удосконаленого для розрахунків на втому при нерегулярному навантаженні ЕТМ та гіпотези лінійного підсумування втомних пошкоджень у форматі (12) або (13). Для визначення сумарного втомного пошкодження необхідно враховувати не менше двох розрахункових станів (судно з повним вантажем та в баластному переході).

Ров'язок задачі визначення допустимого коефіцієнта концентрації напружень $[K_t]_{\text{втом}}$ для суднокорпусного вузла з умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності визначається із розв'язку нелінійного рівняння⁵

$$D([K_t]_{\text{втом}}) = D_3, \quad (22)$$

де значення функції $D([K_t]_{\text{втом}})$ можуть розраховуватись відповідно до (12) або (13).

⁵ Petinov S. V. Life-Cycle Fatigue Reliability of Ship Structures: A Proposed System. Journal of Ship Research. March 2000. Vol. 44. No. 1. P. 33–39.

Розв'язок задачі визначення допустимого параметру зовнішнього навантаження на суднокорпусний вузол з умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності визначається із розв'язку одного з нелінійних рівнянь⁵

$$D([P_0]_{\text{втом}}) = D_3; \quad (23)$$

$$D([\alpha_\sigma]_{\text{втом}}) = D_3, \quad (24)$$

де $[P_0]_{\text{втом}}$, $[\alpha_\sigma]_{\text{втом}}$ – допустимі параметри розподілу зовнішнього навантаження відповідно до лінійного закону та закону Вейбулла.

У першому рівнянні функція $D([P_0]_{\text{втом}})$ виражається формулою (12). У другому рівнянні функція $D([\alpha_\sigma]_{\text{втом}})$ визначається формулою (13).

Задана величина D_3 може включати накопичене у вузлі втомне пошкодження за час перебування судна в одному або декількох розрахункових станах.

Для автоматизації розрахунків за наведеними методиками та ЕТМ в його базовому та удосконаленому варіантах була розроблена комп'ютерна програма «ЕТМ fatigue». Програма розроблена із використанням мови Delphi, має модульну структуру та складається з чотирнадцяти модулів.

Основні результати розділу опубліковані у [2, 3, 7, 8, 11, 12, 16–20, 23, 24].

ВИСНОВКИ

Суднокорпусні конструкції зазнають значних змінних навантажень різної природи, тому необхідно володіти надійними методами розрахунку їх втомної міцності. В дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу удосконалення експериментально-теоретичного методу оцінки втомної міцності суднових корпусних конструкцій. Висновки узагальнюють сукупність вирішених завдань дисертаційного дослідження та включають наступне.

1. В результаті аналізу основних практичних методів оцінки втомної міцності суднокорпусних конструкцій були виділені їх недоліки та переваги й удосконалено класифікацію цих методів. Обґрунтовано доцільність використання експериментально-теоретичного методу для розв'язку типових задач втомної міцності конструктивних вузлів і розробки відповідних практичних методик. Також показано, що експериментально-теоретичний метод потребує удосконалення для вирішення практичних задач.

2. Розроблено алгоритм оцінки втомної міцності типових осередків концентрації напружень при нерегулярному навантаженні з використанням гіпотези лінійного підсумовування втомних пошкоджень.

3. Розроблено критеріальні залежності експериментально-теоретичного методу розрахунку втомної міцності для розрахунку втомної міцності типових осередків концентрації при навантаженні нерегулярного характеру. Поправки на нерегулярність навантаження введені для малоциклової та багатоциклової ділянок кривої втоми.

Надійність таких критеріальних залежностей експериментально-теоретичного методу перевірено порівнянням результатів при їх застосуванні для визначення величини втомного пошкодження вузла перетину поясів рівновисоких балок при стохастичному навантаженні із заданими параметрами довготермінового розподілу

⁵ Petinov S. V. Life-Cycle Fatigue Reliability of Ship Structures: A Proposed System. Journal of Ship Research. March 2000. Vol. 44. No. 1. P. 33–39.

із результатами, отриманими за методами, рекомендованими Міжнародним інститутом зварювання. Різниця між величиною втомного пошкодження вузла, розрахованої модифікованим експериментально-теоретичним методом, та величинами втомного пошкодження, визначеними іншими методами, не перевищувала 12,5 %.

4. На основі виконаних досліджень практично не виявлено впливу середніх номінальних напружень циклу на малоциклову область кривої втоми типового концентратора. Тому криві втоми для випадку регулярного навантаження прийнято будувати за базовими розрахунковими залежностями експериментально-теоретичного методу. Середнє відхилення базової кривої втоми від експериментальних точок в малоцикловій області при імовірності руйнування вузла $P_f = 50\%$ складає всього величину 2,5 МПа в бік зниження втомної міцності, тобто в безпечний бік.

Встановлено, що залишкові зварні напруження у вузлах конструкцій корпусу судна можна приймати релаксованими вже на початку стадії експлуатації. Їх вплив на втомну міцність вузлів при використанні експериментально-теоретичного методу частково приймається в розрахунок за допомогою «прив'язки» до експериментальних даних.

5. Для розрахунку теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень в суднокорпусних вузлах, при наявності стикових та кутових зварних швів, запропоновано застосовувати величини радіусів та кутів нахилу профілю швів у місці переходу від основного металу до наплавленого металу. Такі величини визначаються із заданим рівнем забезпеченості на основі результатів статистичної обробки значної серії представлених в літературних джерелах даних. Останні були отримані на базі зварних з'єднань із характерними для суднокорпусних конструкцій параметрами матеріалу та товщинами, з урахуванням виду зварювання. Це дозволяє розраховувати шуканий коефіцієнт спираючись на величини основних геометричних параметрів реальних зварних швів без виконання їх натурних замірів.

6. На основі виконаних досліджень запропоновано спрощений метод визначення теоретичного коефіцієнта концентрації зварного конструктивного вузла. Шуканий коефіцієнт за таким методом можна розрахувати добутком коефіцієнтів концентрації, обумовлених загальною геометрією вузла і геометрією зварного шва при узагальнених значеннях його геометричних параметрів із заданим рівнем забезпеченості, що дозволяє суттєво спростити розрахунки. Різниця між результатами застосування такого методу для визначення теоретичних коефіцієнтів концентрації хрестоподібного зварного з'єднання і вузла перетину поясків рівновисоких балок із результатами розрахунку деталізованих комп'ютерних моделей зазначених вузлів методом скінченних елементів не перевищувала 10 %.

7. Практичне застосування результатів роботи відображено в розроблених практичних методиках для розв'язку за допомогою удосконаленого і базового варіантів експериментально-теоретичного методу задач оцінки втомної міцності суднокорпусного вузла при регулярному і стохастичному навантаженнях, а також проектування вузла та визначення параметрів допустимого навантаження з умови забезпечення заданого рівня втомної міцності. Також розроблено комп'ютерну

програму «ETM fatigue» розв'язку типових задач втомної міцності суднокорпусних вузлів на базі розроблених методик.

Результати досліджень було впроваджено у ТОВ «МАРІН ДИЗАЙН ИНЖИНІРІНГ МИКОЛАЇВ» (м. Миколаїв) для виконання досліджень, пов'язаних із втомною міцністю суднокорпусних конструкцій. Вони використовуються при викладанні дисциплін студентам і аспірантам кораблебудівного навчально-наукового інституту НУК.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, в яких викладено основні наукові результати дисертації

1. Коростильов Л.І., Литвиненко Д.Ю. Удосконалення експериментально-теоретичного методу розрахунку втомної міцності суднових корпусних конструкцій. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. Миколаїв, 2011. № 4 (439). С. 14–21.
2. Коростылёв Л.И., Литвиненко Д.Ю. Анализ микрогеометрических параметров стыковых и угловых сварных швов конструктивных узлов. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. Миколаїв, 2015. № 2 (458). С. 28–34.
3. Коростылёв Л.И., Литвиненко Д.Ю. Оценка коэффициента концентрации напряжений в сварных узлах тонкостенных конструкций расчетом макро- и микроконцентрации. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон, 2015. № 2 (13). С. 174–184.
4. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. Анализ и классификация методов оценки усталостной прочности сварных тонкостенных конструкций корпуса судна. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. Санкт-Петербург, 2016. № 3 (37). С. 104–118.
5. Литвиненко Д.Ю. Об учете средних и остаточных сварочных напряжений при построении кривых усталости судокорпусных конструкций согласно экспериментально-теоретическому методу. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология*. Астрахань, 2016. № 4. С. 19–32.
6. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. Оценка усталостной прочности судокорпусных узлов экспериментально-теоретическим методом с учетом нерегулярности нагружения. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2017. № 1 (50). С. 71–91.
7. Литвиненко Д.Ю. Методики розв'язку задач втомної міцності суднокорпусних вузлів при нерегулярному навантаженні на базі експериментально-теоретичного методу. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2017. № 4 (53). С. 110–125.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Коростильов Л.І., Литвиненко Д.Ю. Використання імовірнісної схеми в експериментально-теоретичному методі оцінки втомної міцності конструкцій суден і морських споруд. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*:

- матеріали III міжнар. наук.-техн. конф. (Миколаїв, 4-6 жовт. 2012 р.). Миколаїв: НУК, 2012. С. 144–147.
9. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. Анализ распространенных в мировой практике методов оценки усталостной прочности сварных тонкостенных конструкций. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. Участю (Миколаїв, 22–24 трав. 2013 р.). Миколаїв: НУК, 2013. С. 199–202.
 10. Литвиненко Д.Ю. Оцінка довговічності конструктивних вузлів суднового корпусу. *Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи*: матеріали конференції КМН-2013 (м. Львів, 23–25 жовтня 2013). Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2013. С. 57–60.
 11. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. Оценка коэффициента концентрации напряжений в сварном узле расчетом макро и микроконцентрации. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю (Миколаїв, 20–22 травня 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015. С. 85–87.
 12. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. Анализ величин радиусов и углов наклона профиля сварных швов в месте перехода от основного металла к металлу шва. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю (Миколаїв, 20–22 травня 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015. С. 87–89.
 13. Коростильов Л.І., Литвиненко Д.Ю. Врахування величини зварних залишкових напружень при побудові кривої втомної міцності корпусу судна відповідно до експериментально-теоретичного методу. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 19–20 травня. 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016. С. 100–103.
 14. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. Усовершенствование экспериментально-теоретического метода оценки усталостной прочности узлов судового корпуса в области средней долговечности. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2016*: матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції (Херсон, 24–26 травня. 2016 р.). Херсон: ХДМА, 2016. С. 344–347.
 15. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. Об учете нерегулярности нагружения при расчете на усталость конструктивных узлов корпуса судна. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції. (Миколаїв, 12–14 жовт. 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016. С. 82–83.
 16. Коростильов Л.І., Литвиненко Д.Ю. Методика розв'язку задач оцінки втомної міцності суднокорпусних вузлів експериментально-теоретичним методом. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден,*

- морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 17–18 травня 2017 р.). Миколаїв: НУК, 2017. С. 19–21.
17. Коростильов Л.І., Литвиненко Д.Ю. Удосконалення експериментально-теоретичного методу розрахунку втомної міцності суднокорпусних конструкцій. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 11–13 жовт. 2017 р.). Миколаїв: НУК, 2017. С. 37–39.
 18. Коростильов Л.І., Литвиненко Д.Ю., Морозан С.М. Комп'ютерна програма розв'язку задач втомної міцності суднокорпусних вузлів *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 11–13 жовт. 2017 р.). Миколаїв: НУК, 2017. С. 112–113.
 19. Литвиненко Д.Ю. Методика розв'язку задачі визначення допустимого параметру зовнішнього навантаження на суднокорпусний вузол з умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності при навантаженні стохастичного характеру. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 23–24 травня 2018 р.). Миколаїв: НУК, 2018. С. 55–57.
 20. Коростильов Л.І., Литвиненко Д.Ю., Морозан С.М. Методика розв'язку задачі визначення допустимого коефіцієнту концентрації напружень для суднокорпусного вузла з умови забезпечення заданого рівня його втомної міцності при стохастичному навантаженні. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 23–24 травня 2018 р.). Миколаїв: НУК, 2018. С. 58–60.
- Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**
21. Коростильов Л.І., Литвиненко Д.Ю. Використання CAE ANSYS в задачах оцінки втомної довговічності. *Актуальні проблеми інженерної механіки*: II міжнар. наук.-техн. конф. (Миколаїв, 22–24 жовт. 2012 р.). Миколаїв: НУК, 2012. С. 32–34.
 22. Литвиненко Д.Ю. Анализ деформационных критериев усталости материалов для оценки усталостной прочности сварных конструктивных узлов. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали V міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 8–10 жовт. 2014 р.). Миколаїв: НУК, 2014. С. 159–160.
 23. Коростылев Л.И., Литвиненко Д.Ю. Определение долговременного распределения напряжений при оценке усталостной прочности узла корпуса судна. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 24–27 вересня 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015. С. 304–305.
 24. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 76716 Державної служби інтелектуальної власності України. Комп'ютерна програма «ETM fatigue» / Л.І. Коростильов, Д.Ю. Литвиненко. Дата реєстрації 08.02.2018.

АНОТАЦІЯ

Литвиненко Д.Ю. Удосконалення експериментально-теоретичного методу розрахунку втомної міцності суднових корпусних конструкцій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 «Конструювання та будівництва суден». – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2019.

Отримала подальший розвиток класифікація методів розрахунку втомної міцності суднокорпусних конструкцій. Показано доцільність застосування експериментально-теоретичного методу для вирішення практичних задач.

Вперше розроблені критеріальні залежності експериментально-теоретичного методу для типового концентратора напружень, які дозволяють виконувати оцінку його втомної міцності при стохастичному навантаженні.

Для розрахунку теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень в конструктивних вузлах від зварних швів вперше запропоновано використовувати величини їх основних геометричних параметрів, визначені на основі статистичної обробки опублікованих в літературі даних.

Удосконалено метод визначення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень зварного вузла добутком таких коефіцієнтів від загальної геометрії і від зварного шва при узагальнених значеннях його геометричних параметрів.

На основі удосконаленого експериментально-теоретичного методу розроблено методики розв'язку типових задач втомної міцності суднокорпусних вузлів та програмне забезпечення.

Ключові слова: втомна міцність, суднокорпусний вузол, крива втоми, втомне пошкодження, концентрація напружень, середні напруження циклу, стохастичне навантаження.

АННОТАЦИЯ

Литвиненко Д.Ю. Усовершенствование экспериментально-теоретического метода расчета усталостной прочности судовых корпусных конструкций. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 – «Конструирование и строительство судов». Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2019 г.

Целью работы является усовершенствование экспериментально-теоретического метода оценки усталостной прочности конструктивных узлов корпуса судна и разработка практических методик решения задач усталостной прочности на базе усовершенствованного метода.

Выполнен анализ основных практических методов оценки усталостной прочности конструкций корпуса судна, на основании чего получила дальнейшее развитие их классификация. Также выделены недостатки и преимущества каждого метода и, таким образом, показана целесообразность использования экспериментально-теоретического метода для решения типовых задач усталостной

прочности конструктивных узлов и разработки соответствующих практических методик.

Разработан алгоритм оценки усталостной прочности типовых очагов концентрации напряжений при нерегулярном нагружении с использованием гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений.

Впервые разработаны критериальные зависимости экспериментально-теоретического метода, которые позволяют выполнять оценку усталостной прочности судокорпусных конструкций не только при регулярном, но и стохастическом нагружении. Поправки на нерегулярность нагружения введены для малоциклового и многоциклового участков кривой усталости.

Надежность таких критериальных зависимостей проверялась сравнением результатов их использования для определения величины усталостного повреждения с результатами, полученными с помощью методов, рекомендуемых Международным институтом сварки. Проверка выполнялась на примере узла пересечения поясков равновысоких балок. Величина усталостного повреждения узла, рассчитанная с использованием модифицированного экспериментально-теоретического метода, превышала всего на 12,5 % результат, полученный методом номинального напряжения. Определенный экспериментально-теоретическим методом результат был ниже на 10,76 %, чем величина усталостного повреждения, полученная методом фиктивного закругления концентратора напряжений, и только на 3,41 % превышала результат применения метода напряжения в «горячей» точке.

На основе выполненного анализа практически не выявлено влияния средних номинальных напряжений цикла на малоцикловую область кривой усталости типового концентратора. Таким образом, кривые усталости для случая регулярного нагружения принято строить по базовым расчетным зависимостям экспериментально-теоретического метода.

Для расчета теоретических коэффициентов концентрации напряжений в конструктивных узлах, обусловленных стыковыми и угловыми сварными швами, впервые предложено использовать величины радиусов и углов наклона профиля таких швов в месте перехода от основного к наплавленному металлу, значения которых при заданном уровне обеспеченности определяются на основании результатов статистической обработки большой серии опубликованных в литературе данных, с учетом вида сварки. В результате статистической обработки построены гистограммы и выравнивающие кривые, определены математические ожидания, среднеквадратические отклонения и параметры логнормального распределения величин радиусов и углов наклона профилей швов в месте перехода от основного металла к металлу шва. Это позволяет получить теоретический коэффициент концентрации напряжений узла без выполнения натурных измерений указанных величин.

Усовершенствован метод расчета теоретического коэффициента концентрации напряжений сварного судокорпусного узла произведением коэффициента концентрации от общей геометрии и коэффициента концентрации сварного шва при обобщенных значениях его геометрических параметров. Это позволяет существенно упростить расчеты и получить результат с незначительным завышением величины

искового коэффициента.

Разработаны методики решения следующих задач: проверка усталостной прочности судокорпусного узла, проектирование конструктивного узла из условия обеспечения заданного уровня его усталостной прочности и определение допустимого нагружения на узел из того же условия.

На основе базового и усовершенствованного вариантов экспериментально-теоретического метода и указанных ранее методик разработано программное обеспечение «ETM fatigue» для решения задач усталостной прочности.

Ключевые слова: усталостная прочность, судокорпусный узел, кривая усталости, усталостное повреждение, концентрация напряжений, средние напряжения цикла, стохастическое нагружение.

SUMMARY

Lytvynenko D. Improvement of the experimental and theoretic method for fatigue assessment of ship structures. – Manuscript.

Thesis for obtaining the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences on speciality 05.08.03. – «Design and building of ships». Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2018.

The classification of current fatigue assessment methods of ship structures has been further developed. The expediency of the experimental and theoretic method has been shown.

Dependencies of the experimental and theoretic method for fatigue assessment of ship structures in conditions of stochastic loading have been developed for the first time.

It was proposed for the first time to use results of the statistical treatment of published data of weld toe radii and angles in butt and fillet welds for the determination of stress concentration factors due to welds in ship structural assemblies.

The method for determining stress concentration factors for ship structural welded assemblies as the product of stress concentration factors due to the overall geometry and due to the weld have been improved through the determination of the latter on the basis of its generalized geometric parameters.

Methodologies and the computer program for solution of typical fatigue problems were developed on the basis of the experimental and theoretic method.

Keywords: fatigue strength, ship structural assembly, fatigue curve, fatigue damage, stress concentration, cycle mean stress, stochastic loading.