

ФГБОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

РОССИЙСКОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СУДОСТРОИТЕЛЕЙ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА А.Н. КРЫЛОВА

ФГУП «КРЫЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР»

Всероссийская
научно-техническая

КОНФЕРЕНЦИЯ

по строительной
механике корабля,

посвященная 160-летию со дня рождения

Алексея Николаевича КРЫЛОВА

и 140-летию со дня рождения

Юлиана Александровича ШИМАНСКОГО

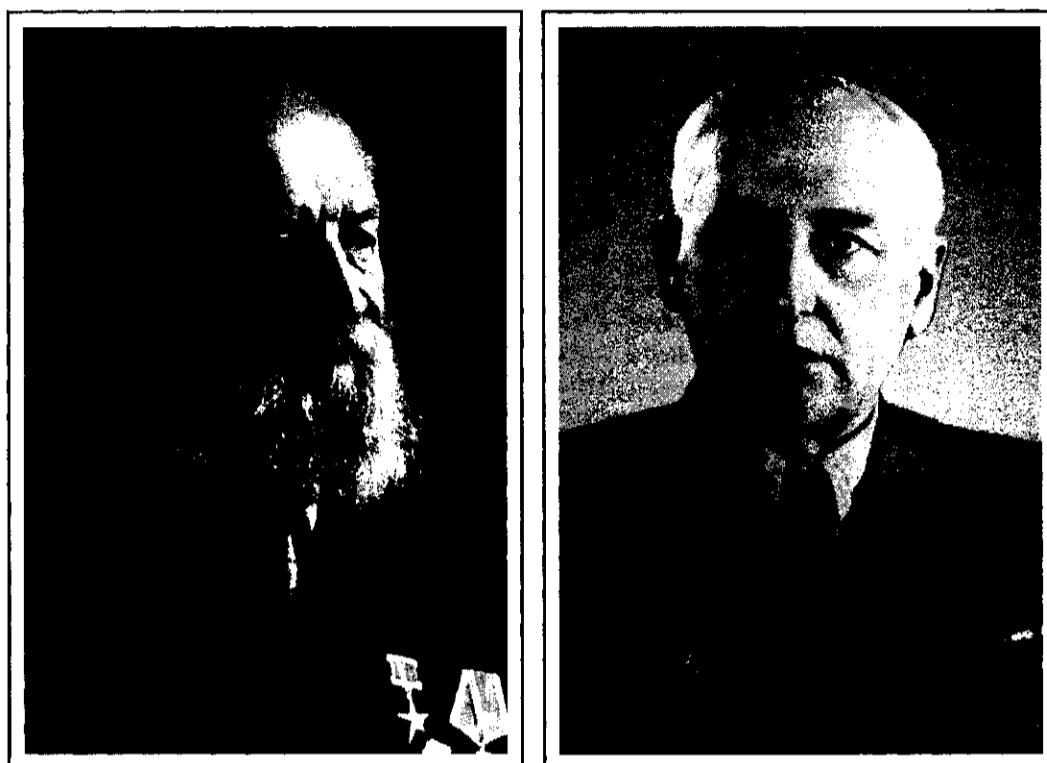
«Памяти академиков-кораблестроителей»

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«КРЫЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР»

ФГБОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

РОССИЙСКОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СУДОСТРОИТЕЛЕЙ
имени академика А.Н. Крылова



А.Н. Крылов (15.08.1863 – 26.10.1945) Ю.А. Шиманский (17.12.1883 – 11.04.1962)

Всероссийская научно-техническая

КОНФЕРЕНЦИЯ

ПО СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ КОРАБЛЯ
«ПАМЯТИ АКАДЕМИКОВ-КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЕЙ»

посвященная 160-летию со дня рождения

Алексея Николаевича КРЫЛОВА

и 140-летию со дня рождения

Юлиана Александровича ШИМАНСКОГО

20–21 декабря 2023 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Санкт-Петербург
2023

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Сопредседатели:	д.т.н., профессор, заведующий кафедрой строительной механики корабля СПбГМТУ, руководитель научной школы РАЕ «Развитие методов вычислительной механики для решения основных задач строительной механики корабля по созданию конструкций с заданными характеристиками надежности, эффективности и технологичности» Родионов А.А. д.т.н., профессор, президент РосНТО судостроителей имени академика А.Н. Крылова Никитин В.С. к.т.н., начальник Отделения прочности и надежности конструкций ФГУП «Крыловский государственный научный центр», заведующий Базовой кафедрой «Прочности и конструкции корабля» СПбГМТУ Шапошников В.М.
Члены оргкомитета:	д.т.н., профессор Половинкин В.Н. , научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр» д.т.н., профессор Демешко Г.Ф. , профессор кафедры проектирования судов СПбГМТУ д.т.н., профессор Крыжевич Г.Б. , начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр», профессор кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ д.т.н., профессор Тряскин В.Н. , заведующий кафедрой конструкций и технической эксплуатации судов СПбГМТУ д.т.н. Ярцев Б.А. , начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр», председатель ГАК СПбГМТУ по направлению 15.04.03 «Прикладная механика» д.т.н. Дульнев А.И. , начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр», председатель ГАК СПбГМТУ по направлению 15.03.03 «Прикладная механика» к.т.н., доцент Фрумен А.И. , профессор кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ, ученый секретарь Ученого Совета СПбГМТУ к.т.н. Александров А.В. , начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр» к.т.н. Коришунов В.А. , доцент кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ к.ф.-м.н. Платонов В.В. , начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр» к.т.н. Тумашик Г.А. , начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр», доцент Базовой кафедры «Прочности и конструкции корабля» СПбГМТУ к.т.н. Миронов М.Ю. , доцент кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ
Ученый секретарь:	Мудрик Р.С. , преподаватель, аспирант кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ
Секретарь:	
Руководители секций:	
Секция А	к.т.н. Александров А.В. , д.т.н. Кутейников М.А. , д.т.н., проф. Родионов А.А.
Секция В	к.т.н., проф. Фрумен А.И. , к.т.н., доц. Тумашик Г.А. , к.т.н., доц. Миронов М.Ю.
Секция С	д.т.н., проф. Крыжевич Г.Б. , д.т.н. Дульнев А.И. , к.т.н., проф. Фрумен А.И.
Секция D	к.т.н., доц. Пономарев Д.А. , д.т.н. Ярцев Б.А. , к.т.н., доц. Коришунов В.А.
Секция E	к.т.н., доц. Рюмин С.Н. , к.т.н., доц. Овчинников К.Д.
Секция F	к.т.н., доц. Миронов М.Ю. , преп. Мудрик Р.С.

Сборник содержит тезисы докладов, поданных в 2023 г. на НТК по СМК «Памяти академиков-кораблестроителей». За помощь в проведении конференции Оргкомитет выражает благодарность **Дорофееву В.Ю.** (АО «СПМБМ «Малахит»), **Щербакову И.В.** (ООО «ПКБ «Петробалт»), **Савченко О.В.** (ФГУП «Крыловский государственный научный центр»).

Материалы даны в авторской редакции.

ISBN 978-5-903002-28-3

© ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2023

Молоков К.А., Новиков В.В. Оценка остаточной надежности судокорпусных конструкций из феррито-перлитных сталей с макротрещинами по структурным и механическим характеристикам. Тезисы доклада на научно-технической конференции по строительной механике корабля «Памяти академиков-кораблестроителей» 20-21 декабря 2023 г. ISBN 978-5-903002-28-3. ФГУП Крыловский государственный научный центр. 2023 г. С. 27–29

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

Родионов А.А.

УЧЕНЫЙ, КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬ, АКАДЕМИК. К 160-ЛЕТИЮ

АЛЕКСЕЯ НИКОЛАЕВИЧА КРЫЛОВА7

Родионов А.А.

ИНЖЕНЕР, КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬ, АКАДЕМИК. К 140-ЛЕТИЮ

ЮЛИАНА АЛЕКСАНДРОВИЧА ШИМАНСКОГО 10

СЕКЦИЯ А

Андрюшин А.В., Воронин А.Ю., Рябушкин С.В., Федосеев С.С.,

Бедкер А.А., Разинков А.В., Зобов А.И.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВИНТО-РУЛЕВЫХ КОЛОНОК (ВРК) ДЛЯ

УСТАНОВКИ НА ЛЕДОКОЛАХ И СУДАХ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ 13

Аносов А.П., Макарова Т.А.

ВЛИЯНИЕ ДИАГОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАМНОГО НАБОРА

НА ЖЕСТКОСТЬ БОРТОВОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ СДВИГЕ 15

Аносов А.П., Макарова Т.А.

ВЛИЯНИЕ БОРТОВЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ, ПОДКРЕПЛЕННЫХ ДИАГОНАЛЬНЫМИ БАЛКАМИ

РАМНОГО НАБОРА, НА ЖЕСТКОСТЬ КОРПУСА СУДНА ПРИ КРУЧЕНИИ 17

Антонов К.В., Гежа Д.В., Сергеева Ю.И., Щербаков И.В.

ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КОРПУСА МОДУЛЬНЫХ САМОПОДЪЕМНЫХ

ПЛАТФОРМ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ 19

Бойко М.С.

РАЗРАБОТКА РУКОВОДСТВА ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ КОРПУСНЫХ

КОНСТРУКЦИЙ И ИНТЕНСИВНОСТИ ИСПАРЕНИЯ ГРУЗА ИЗ ЕМКостей ДЛЯ

СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА 21

Крыжевич Г.Б.

ЛЕДОВЫЕ НАГРУЗКИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПРОЧНОСТЬ КРЕПЛЕНИЯ АНОДОВ СИСТЕМЫ

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПЛАТФОРМЫ «МОЛИКПАК» 23

Крыжевич Г.Б.

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ХРУПКИХ

И ВЯЗКИХ РАЗРУШЕНИЙ СУДОВ И МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ

ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ШЕЛЬФА И ВОПРОСЫ ИХ РАЦИОНАЛЬНОГО

КОНСТРУИРОВАНИЯ 25

Молоков К.А., Новиков В.В.

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ НАДЕЖНОСТИ СУДОКОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ИЗ ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ С МАКРОТРЕЩИНАМИ ПО СТРУКТУРНЫМ

И МЕХАНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ 27

Мудрик Р.С., Родионов А.А.

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ПРОЦЕДУР В ОЦЕНКЕ НЕЛИНЕЙНЫХ

ВОЛНОВЫХ НАГРУЗОК НА КОРПУС СУДНА 30

Родионов А.А., Рябушкин С.В.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕССЕТЧНЫХ ПРОЦЕДУР ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО

ПОВЕДЕНИЯ ЛЬДА В УСЛОВИЯХ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ 32

Тряскин В.Н., Иванова Д.Т., Булкин В.А.

ПОИСКОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПД ПО ТРЕБОВАНИЯМ

К ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ОБЩЕМ ПРОДОЛЬНОМ ИЗГИБЕ ДОКА 34

Тряскин В.Н., Дехтярь И.В., Рюмин С.Н.

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ

ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ПЕРЕБОРОК СУДОВ

ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ НАВАЛОЧНЫХ ГРУЗОВ 36

СЕКЦИЯ А

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ НАДЕЖНОСТИ СУДОКОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ФЕРРИТО-ПЕРИТНЫХ СТАЛЕЙ С МАКРОТРЕЩИНАМИ ПО СТРУКТУРНЫМ И МЕХАНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

МОЛОКОВ К.А., НОВИКОВ В.В.

Департамент промышленной безопасности Политехнического института,
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Надежность конструкций судового корпуса напрямую связана с критической плотностью повреждений и их величиной. В условиях волнения и вибраций корпус испытывает циклические нагрузки с разными частотами и амплитудами, поэтому его эксплуатация в жизненном цикле судна практически маловероятна без повреждений в виде возникающих микро и макротрещин. Актуальной задачей остается определение плотности повреждений или их величины, необходимых для оценки момента начала катастрофического разрушения.

В работе представлена зависимость для расчета предельного (критического) повреждения (размера макротрещины) на базе известных основных механических характеристик и параметров структуры металла. Она позволяет также оценить влияние на предельное состояние таких важных характеристик, как коэффициенты упрочнения и Пуассона, предел текучести и эффективный диаметр зерна материала.

Ключевые слова: Корпусная конструкция, критическая макротрещина, КИН, пороговый коэффициент интенсивности напряжений, диаметр зерна, коэффициент упрочнения, феррито-перлитная сталь

The reliability of the ship's hull structures is directly related to the critical damage density and their magnitude. In conditions of excitement and vibrations, the hull experiences cyclic loads with different frequencies and amplitudes, therefore its operation in the life cycle of the vessel is almost unlikely without damage in the form of emerging micro and macro cracks. An urgent task remains to determine the damage density or their magnitude, which is necessary to assess the moment of the onset of catastrophic destruction.

The paper presents a dependence for calculating the limiting (critical) damage (size of a macrofracture) based on the known basic mechanical characteristics and parameters of the metal structure. It also allows us to evaluate the effect on the limiting state of such important characteristics as the hardening and Poisson's coefficients, yield strength and effective grain diameter of the material.

Keywords: Body structure, critical macrofracture, KIN, threshold stress intensity coefficient, grain diameter, hardening coefficient, ferrite-pearlite steel.

Постановка проблемы. Известно, что в судокорпусных сварных конструкциях со временем появляются повреждения в виде усталостных трещин. Они, как правило, берут свое начало от концентраторов напряжений, в частности, от сварных швов и др.[1]. В жестких точках, где имеются сварные швы, трещины могут распространяться вдоль них (продольная трещина) в области зоны термического влияния (ЗТВ), имеющей наименьшую трещиностойкость или усталостную прочность (рис. 1).

Под влиянием температурно-деформационных циклов в ЗТВ как структурные, так и механические характеристики после сварки будут значительно отличаться от характеристик основной стали. Поэтому с точки зрения адекватности расчетов, для определения критической длины $L_{кр}$ продольной сквозной трещины в ЗТВ, необходимо иметь зависимости, базирую-

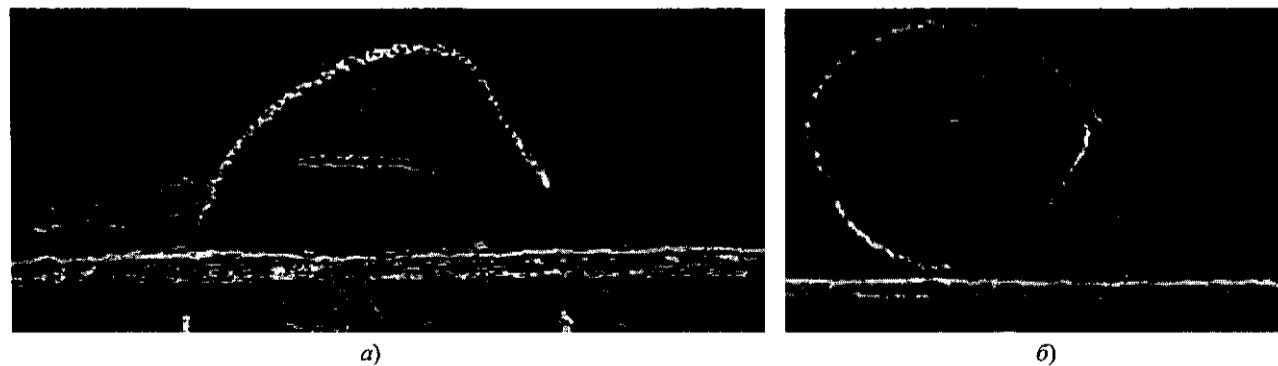


Рис. 1. Трещины в наружной обшивке в ЗТВ сварных соединений т/х «Ладога» [4]

щиеся на структурных и механических входных данных. Поиск одной из таких зависимостей и является целью данной работы.

Следует отметить, что по мере эксплуатации конструкций происходит деградация характеристик стали. Это дополнительно приводит к ухудшению характеристик ее трещиностойкости, учесть которое представляется возможным только с учетом оценки параметров ее структуры [3]. Таким образом, представляется необходимым установить взаимосвязь критической длины трещины $L_{кр}$ с характеристиками металла, имеющими склонность к изменению в процессе старения.

Основные результаты. Несомненно, привлекательным является непосредственное вычисление критической длины трещины без наличия известных значений предела выносливости и K_{Ic} . На практике такая возможность удобна, так как позволяет сразу определить известную длину существующей трещины относительно ее расчетного критического размера $L_{кр}$. Кроме того, это даст возможность проанализировать влияние основных структурных и механических характеристик на $L_{кр}$. Существуют различные подходы и возможности для определения этой длины [1, 2, 4], например, в одном из источников рассмотрен подход, основанный на структурно деформационном критерии начала критического разрушения. Однако предложенная зависимость существенно чувствительна к входящим значениям параметров, в частности к коэффициенту Пуассона [4]. По этой причине использование данного подхода на практике может быть затруднено.

Примем следующие допущения и формализуем задачу:

1) Для простоты выводов положим, что предел выносливости равен пределу текучести. Данное условие, как показывает анализ, не является обязательным.

2) Для пороговой характеристики будем считать, что источником микроскола является субмикротрещина у границы действительного зерна, а напряжение микроскола при истинной деформации $e = 1$ возрастает в 1,618 раз от напряжений микроскола при $e = 0$.

3) Главные моды фрагментов для феррито-перлитных сталей, согласно предыдущему пункту, составляют в 2,618 меньше среднего диаметра зерна и являются константой в рамках полученных выводов.

4) Критический скачек макротрещины происходит при значении K_{Ic} и для феррито-перлитных сталей составляет 0,618 диаметра зерна.

Принимая во внимание принятые допущения и основываясь на концепции критической плотности упругой энергии деформации, предложенной в модели Дж. Си [2], будем считать правомерным следующее обстоятельство. Отношение квадратов порогового и критического коэффициентов интенсивности напряжений обладает пропорциональностью по отношению величин, соответствующих им длин трещин в начальной (пороговой) и конечной (критической) стадии ее стабильного развития. Тогда полудлина критической сквозной макротрещины при условии плоской деформации в ее вершине может быть представлена зависимостью:

$$L_{кр} = \frac{4,944}{(2\mu - 1)^2} \left(\frac{4,6113(m+1)(1-2\mu) \cdot d_g^{\left(\frac{m-1}{2m+2}\right)}}{\left(\frac{(m+1)(2\mu-1)}{\sqrt{3}} + 1\right) \cdot \sigma_{0.2}} \right)^{\frac{1+m}{m}}, \quad (1)$$

где m – показатель степенного упрочнения стали; μ – коэффициент Пуассона; d_g – средний диаметр зерна стали, м; $\sigma_{0.2}$ – предел текучести стали, МПа.

Не трудно заметить, что зависимость приобретает неопределенность 0/0 при $\mu = 0,5$. Это представляется логичным, так как такое значение сталь приобретает в полностью пластическом состоянии. Поэтому говорить о критической трещине для такого материала нет смысла.

СЕКЦИЯ А

Все аргументы, входящие в эту формулу, в некотором роде взаимосвязаны физически, но для разных марок феррито-перлитной стали они могут варьироваться. Это может характеризовать ту, или иную сталь, как обладающую большей сопротивляемостью к окончательному разрушению. В то же время необходимо отметить, что длительность стадий разрушений в целом зависит не только от конечной длины критической трещины, но и от скорости продвижения (скорости развития) трещины на этапах ее роста. Поэтому однозначно не стоит связывать отмеченное обстоятельство с сопротивляемостью развитию трещины в процессе разрушения

Взаимосвязь между пределом текучести стали и средним диаметром зерна может быть получена на основе известного выражения Холла-Петча по экспериментальным данным феррито-перлитных сталей обычной и средней прочности. Заменяя в (1) $\sigma_{0,2}$ на зависимость Холла-Петча, будем иметь, что фактически $L_{кр}$ определяется некоторыми микрофизическими константами материала σ_0 – сопротивлением деформированию монокристалла, k – коэффициентом Холла-Петча, d_g и m . Так как структурно-механическая модель справедлива для областей мезоуровня, то и преобразованное выражение (1) будет справедливо только в области зерно-граничного упрочнения, т.е. когда $k > 0$.

Заключение. Полученная формула в виде (1) отражает зависимость влияния основных концептуальных характеристик и параметров, участвующих в структурно-механической модели, на размер критической макротрещины. Она интересна тем, что позволяет проанализировать, а в некоторых случаях – и спрогнозировать наилучшие комбинации значений характеристик m , μ , d_g и $\sigma_{0,2}$ сталей, отличающиеся большими $L_{кр}$, в том числе для прогнозирования остаточного ресурса судна с большими макротрещинами в условиях состарившихся феррито-перлитных сталей судового корпуса. В дальнейшем предполагается развитие дальнейших исследований, анализ и оценка снижения несущей способности судового корпуса с трещинами в зонах термического влияния сварных швов судовых конструкций, и в том числе, с учетом старения стали.

Литература

1. Казанов Г.Т., Новиков В.В., Турмов Г.П. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций. Монография. – Владивосток: ДВФУ, 2014. 178 с.
2. Матюхин Г.В., Горбачев К.П. Инженеру о сопротивлении материалов разрушению. Монография. – Владивосток: Дальнаука, 2010. 281 с.
3. Молоков К.А., Новиков В.В., Антоненко С.В. Повреждаемость судовых конструкций и основы построения математической модели оценки трещиностойкости конструкционных сталей. Труды Крыловского государственного научного центра, 2022; Специальный выпуск 1: 46–54.
4. Молоков К.А. и др. Аналитический метод определения критической длины трещин в судовых конструкциях на основе структурно-деформационного анализа / К.А. Молоков, А.И. Мамонтов, В.В. Новиков, А.П. Герман // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 2-1(48). – С. 56-63. – DOI 10.37220/МИТ.2020.48.2.058. – EDN AAXCGQ.