

Теория корабля и строительная механика

Научная статья

УДК 629.12.001.2

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-3/30-36>

А.И. Мамонтов, Г. Китио, М.В. Китаев, О.Э. Суров

МАМОНТОВ АНДРЕЙ ИГОРЕВИЧ – к.т.н., доцент, Andrew.Mamontov@outlook.com✉

КИТИО ГЕРМАН – магистрант направления «Кораблестроение, океанотехника

и системотехника объектов морской инфраструктуры», kitio.ge@students.dvfu.ruКИТАЕВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент, директор Департамента морской техники и транспорта, kitaev.mv@dvfu.ruСУРОВ ОЛЕГ ЭДУАРДОВИЧ – к.т.н., доцент, surov.oye@dvfu.ru

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Расчет усталостных повреждений судна в ледовых условиях

Аннотация. Показана зависимость времени эксплуатации от хода S-N кривой в малоцикловой области. Обычно S-N кривая представлена двумя участками в диапазоне числа циклов более 10^4 и небольшими размахами напряжений. В ледовых условиях размахи напряжений достигают предела прочности, а разрушение происходит при меньшем числе циклов. В этом случае на время эксплуатации по условиям усталостного разрушения существенное влияние оказывает первый участок S-N кривой. Рассмотрены три варианта хода S-N кривой на первом участке. Для каждого участка произведен расчет времени эксплуатации судна. Показано, что снижение времени эксплуатации достигает 2,5 раза при ходе S-N кривой по нижнему участку.

Ключевые слова: усталость, ледовая нагрузка, накопление повреждений, малоцикловая область

Для цитирования: Мамонтов А.И., Китио Г., Китаев М.В., Суров О.Э. Расчет усталостных повреждений судна в ледовых условиях // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 3(52). С. 30–36.

Введение

В условиях эксплуатации судна во льдах напряжения в конструкции достигают больших значений. Для расчета усталостных повреждений применяется S-N кривая. Классический расчет усталости дает значительную погрешность, так как основан на двух сегментах S-N кривой и числе циклов более 10^4 . В работе предпринимается попытка исследовать влияние усталостных повреждений первого участка S-N кривой на результат расчета, который соответствует минимальному числу циклов.

На расчет существенное влияние оказывает закон распределения размахов напряжений, вызываемых ледовой нагрузкой в узлах судового корпуса. Чтобы установить этот закон, проведен эксперимент по замеру деформаций бортового перекрытия при контакте корпуса портового буксира со льдом. Выполнен расчет бортового перекрытия по МКЭ, чтобы перейти от деформаций к напряжениям.

Описание S-N кривой

Поведение материала в малоцикловой области и ход S-N кривой зависят от множества факторов, и при отсутствии экспериментальных исследований по конкретному узлу установить

его достаточно трудно [2]. Во всем многообразии можно выделить ряд закономерностей. Первый участок S-N кривой начинается на пределе прочности материала, для судостроительной стали это 392 МПа. Завершается первый участок на пределе текучести, после чего материал работает упруго. Точки перехода с первого на второй участок зависят от наклона первого участка. В зависимости от поведения материала выделены 3 угла наклона.

Так как данных по наклону S-N кривой на первом участке нет, для рассматриваемого узла введены три возможных сценария поведения материала: высокий уровень S-N кривой, средний и низкий. Для каждого уровня в работе сделан расчет времени эксплуатации.

Цели работы

1. Проверить учет малоциклового участка на время эксплуатации узла судового корпуса.
2. Установить закон изменения обеспеченности размахов ледовой нагрузки на корпус судна.

Натурный эксперимент

В ходе эксперимента, условия проведения которого подробно описаны в работе [3], выполнен замер деформаций бортового перекрытия портового буксира-кантовщика при работе во льдах. Записаны осциллограммы деформаций (блоки нагружений) в мелкобитом и сплошном льду; рассмотрена осциллограмма для сплошного льда. Для записи деформаций применялись 5 акселерометров, установленных в разных точках бортового перекрытия. Одним из основных результатов является осциллограмма деформаций верхнего пояса бортового стрингера (рис. 1).

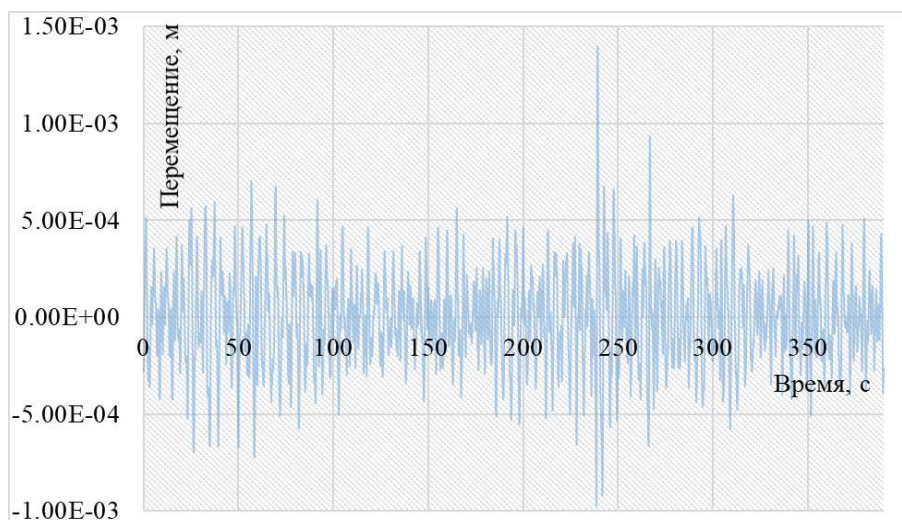


Рис. 1. Осциллограмма деформации бортового перекрытия при контакте со льдом

Закон изменения этой деформации носит случайный характер, но может быть обработан статистически. В результате такой обработки установлено, что обеспеченность размаха деформации, то есть вероятность появления размахов меньше заданной величины и подчиняется, как множество случайных процессов, закону Вейбулла. Параметры закона могут варьировать, но их можно установить экспериментально для ледового воздействия.

Перед этим важно перейти от размаха деформаций к размаху напряжений в конкретном узле перекрытия.

Напряжения в конструкции растут прямо пропорционально деформациям. Если их рассчитать для фиксированной деформации, то осциллограмму можно пересчитать линейно в осциллограмму напряжений. Эпюра деформаций в фиксированный момент времени показана на рис. 2. Максимальный прогиб стрингера в точке замера деформаций равен 2 мм. Интенсивность и распределение нагрузки соответствуют изгибу шпангоута; деформации перекрытия в местах

установки остальных датчиков совпадают с данными других акселерометров. Эпюра напряжений в шпангоуте при этом изгибе показана на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что максимальный уровень напряжений по абсолютному значению действует в пролете шпангоута 180 МПа и в соединении с флором 170 МПа. С точки зрения технологии изготовления соединение шпангоута с флором более опасное место. Поэтому дальнейший расчет срока службы будем проводить для интенсивности 170 МПа в месте соединения с флором.

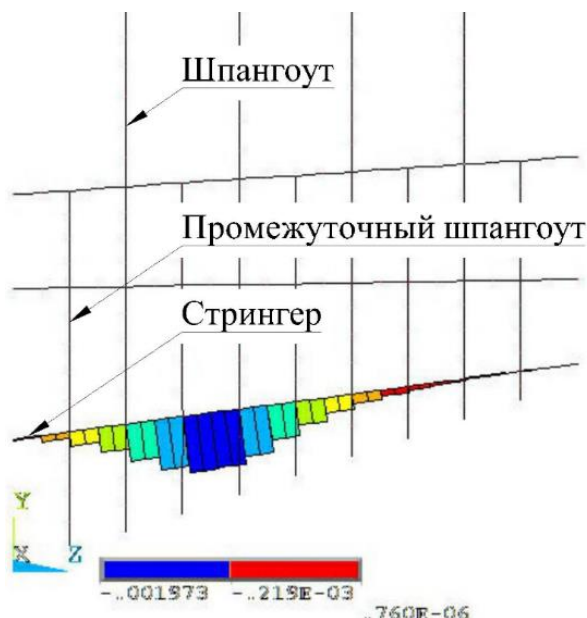


Рис. 2. Бортовое перекрытие и эпюра перемещения стрингера

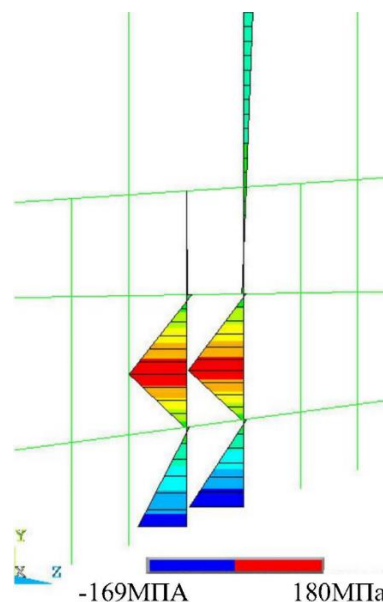


Рис. 3. Эпюра напряжений в шпангоуте при прогибе стрингера 2 мм

График обеспеченности размахов напряжений по данным осциллограммы (см. рис. 1) показывает, что максимальный размах равен 170 МПа (рис. 4). На рисунке показаны данные эксперимента и графика распределения Вейбулла, параметры которой равны $\xi=0.64$, $q=8$. Видно, что параметры распределения Вейбулла и данные эксперимента почти совпадают. Это означает, что распределение размахов напряжений, вызванных ледовой нагрузкой на корпус судна, с большой степенью достоверности может быть описан законом распределения Вейбулла.

Максимальный уровень напряжений, зафиксированный в эксперименте в интервале 290 с – 170 МПа. График Вейбулла показывает, что в связи с наличием асимптоты вероятность появления размахов больше, чем в эксперименте.

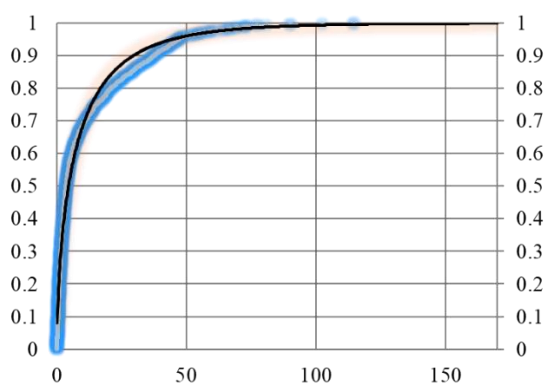


Рис. 4. График обеспеченности размахов напряжений:
синие линии – данные эксперимента; черная – график распределения Вейбулла

Сопротивление конструкции ледовому воздействию, параметры которого установлены выше, выражается через S-N кривую, то есть через зависимость размаха напряжений от числа циклов, который выдержит узел без разрушения.

Для каждого узла судового корпуса предусмотрена своя S-N кривая. Класс S-N кривой – это размах напряжений для 2 млн циклов. Чем менее качественно выполнено соединение, тем ниже уровень напряжений и класс S-N кривой. Для рассматриваемого узла воспользуемся справочными данными [4].

Соединение шпангоута с флором в конструкции судна, на котором проводился эксперимент, выполнено ручной дуговой сваркой. Из-за низкого качества выполненных работ неизбежен эксцентриситет в соединяемых кромках (рис. 5).



Рис. 5. Эксцентриситет в соединяемых кромках:
 t – толщина соединяемых деталей; e – эксцентricность соединения;
 θ – угол скоса кромок сварного соединения в точке притыкания

Условный класс S-N кривой для этого типа соединения равен 20 (рис. 6).

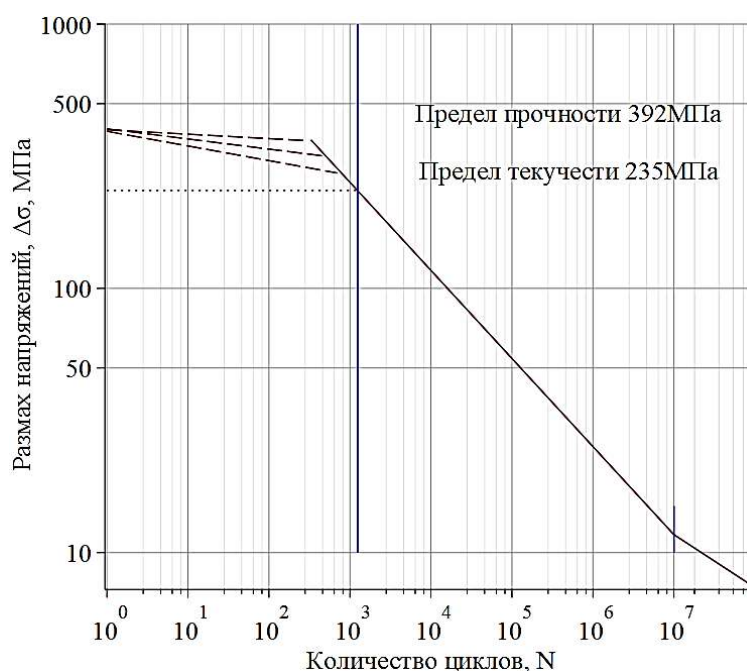


Рис. 6. S-N кривая класса 20. Пунктиром отмечены 3 кривые

В Правилах DNV S-N кривые слева ограничены числом циклов 104. В ледовых условиях уровень напряжений существенно выше, а число циклов до разрушения ниже [5–9].

Покажем, как изменится срок службы узла в зависимости от хода S-N кривой слева. Выполним моделирование поведения материала при меньшем числе циклов. Для этого продлим линию влево, как показано на рис. 6. Узел сохраняет работоспособность до предела прочности материала, равного 392 МПа, но после достижения предела текучести в 235 МПа, ход кривой меняет угол, что снижает прочность соединения из-за развития глубокой пластики в ходе каждого цикла [2].

В зависимости от таких факторов, как материал, тип нагружения и т.д., ход кривой меняется по-разному. Проведем 3 кривые в малоцикловой области (см. рис. 6). Рассчитаем коли-

чество повреждений D , накопленное за год непрерывной эксплуатации судна в сплошном ледяном поле. Расчет повреждений производится по правилу линейного суммирования и стандарту DNV. Процедура верифицирована и является стандартом для расчета усталости соединений [4].

Исходные данные для расчета продолжительности эксплуатации экспериментального судна следующие:

$n_0 = 1020$ – число циклов на осциллограмме за 390 с;

$ND = 8.2541 \cdot 10^7$ – число циклов за условный год эксплуатации в сплошном ледяном поле;

$K_2 = 1.5998895 \cdot 10^{10}$ – параметр S-N кривой на участке от 107 до 1010;

$K_3 = 2.192448042 \cdot 10^{12}$ – параметр S-N кривой на участке после 107;

$m=3$; Δm – параметры S-N кривой на этих участках;

$K_{41} = 0.5 \cdot 10^{47}$, $K_{42} = 0.5 \cdot 10^{68}$, $K_{43} = 0.5 \cdot 10^{156}$, $m_{11} = 18$, $m_{12} = 26$, $m_{13} = 60$ – параметры S-N кривых на участках до 104, отмеченных пунктиром.

$\Delta \sigma_q = 11,7$ размах напряжений, соответствующий пересечению 2 и 3 сегментов S-N кривой.

Расчет проведен согласно формулам, приведенным в [3] и правилах DNV [4] (см. таблицу).

Результаты расчета усталостных повреждений и времени эксплуатации до разрушения

Участки S-N кривой	Классический расчет усталости			
	Повреждения		Время эксплуатации, ч	
Классический расчет усталости по двум участкам	D	187.4	8766/D	47
	Расчет усталости без учета малоциклового участка			
	Повреждения		Время эксплуатации, ч	
До нижней пунктирной линии	D	174.2	8766/D	50
До средней пунктирной линии	D	180.5	8766/D	48.5
До верхней пунктирной линии	D	183.8	8766/D	47.7
	Расчет усталости только в малоциклового участка			
	Повреждения		Время эксплуатации, ч	
Только нижняя пунктирная линия	D	304.8	8766/D	29
Только средняя пунктирная линия	D	99.6	8766/D	88
Только верхняя пунктирная линия	D	26	8766/D	377
Классический расчет усталости по двум участкам плюс:	Расчет усталости с учетом малоциклового участка			
	Повреждения		Время эксплуатации, ч	
Нижняя пунктирная линия	D	479	8766/D	18.3
Средняя пунктирная линия	D	280.1	8766/D	31.3
Верхняя пунктирная линия	D	209.8	8766/D	41.8

Заключение

Исходя из заявленных целей работы установлено, что распределение размахов ледовой нагрузки подчиняется закону Вейбулла (см. рис. 4). Параметр этого закона для ледовой нагрузки меньше, чем параметр распределения размахов для волновой нагрузки, и равен 0,64. Напряжения в узлах судового корпуса при работе в ледовом поле близки к значениям предела прочности для материала, поэтому малоциклового участок S-N кривой вносит значительный вклад в расчет времени эксплуатации.

Экспериментальное судно не предназначено для работы в сплошном льду. Выход в такие районы может быть случайным, и время работы корпуса ограничено часами, что и подтвердил расчет.

По классическому расчету усталости для экспериментального судна и при низком качестве выполнения соединения шпангоута с флором время работы узла судового корпуса до разрушения в сплошном ледяном поле составит 47 ч.

При учете малоциклового областа время эксплуатации узла снижается в 2,5 раза – до 18 ч, при ходе S-N кривой по среднему пунктиру сокращается в 1,5 раза, по верхнему пунктиру уменьшается на 12% – с 47 до 42 ч.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на уточнение хода S-N кривой на первом участке для конкретных типов узлов судового корпуса, а также на накопление, получение, обработку и систематизацию осциллограмм деформаций при контакте корпуса со льдом.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бойцов Г.В. Вероятностные методы в расчетах прочности и надежности судовых конструкций. Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2007. 263 с.
2. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. Москва: Машиностроение, 1997. 232 с.
3. Мамонтов А.И., Китаев М.В., Молоков К.А., Суров О.Э. Усталостные повреждения судов при эксплуатации во льдах: оценка упругих деформаций корпуса буксирного судна проекта 498 при контакте со льдом // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 3(48). С. 49–56. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-3-6
4. Международный стандарт. Оценка усталости судовых конструкций. Нормативно-технический материал. DNV GL AS, 2018. 236 с.
5. Нормативы ShipRight FDA ICE. Усталость, вызванная ледовой нагрузкой: Регистр Ллойда, 2010.
6. Обзор нормативов ShipRight FDA: Регистр Ллойда, 2007.
7. Проверка конструкции на усталость FDA ShipRight: Регистр Ллойда, 2004.
8. Хоббахер А. Расчет сварных соединений и деталей на усталость. Рекомендации совместной рабочей группы. XIII–XV. 128 с.
9. Чжан Ш. Расчетная усталостная оценка судовых конструкций, вызванная ледовой нагрузкой. Введение в процедуру ShipRight FDA ICE: Регистр Ллойда, 2011. 16 с.

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-3/30-36>

Mamontov A., Kitio H., Kitaev M., Surov O.

ANDREY I. MAMONTOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

Andrew.Mamontov@outlook.com✉

HERMANN KITIO, Master Student, kitio.ge@students.dvfu.ru

MAKSIM V. KITAEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

Head of Department, kitaev.mv@dvfu.ru

OLEG E. SUROV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, surov.oye@dvfu.ru

Polytechnic Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Calculation of fatigue damage to a vessel in ice conditions

Abstract. The dependence of the operating time on the moves of the S-N curve in the low-cycle region is shown. Typically, the S-N curve is represented by two sections in the range of the number of cycles more than 10⁴ and small stress amplitude. Under ice conditions, stress ranges reach the ultimate strength, and failure occurs with a smaller number of cycles. In this case, the first section of the S-N curve has a significant effect on the operating time under fatigue failure conditions. Three variants of the S-N curve in the first section are considered. For each section, the calculation of the time of operation of the vessel was made. It is shown that the reduction in operating time reaches 2.5 times when the S-N curve moves along the lower section.

Keywords: fatigue, ice load, total predicted fatigue damage, low cycling

For citation: Mamontov A., Kitio H., Kitaev M., Surov O. Calculation of fatigue damage to a vessel in ice conditions. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(3):30-36. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Boytsov G. Probabilistic methods in calculating the strength and reliability of ship structures. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2007. 263 p. (In Russ.).
2. Kogaev V. Strength calculations for time-dependent stresses. Moscow, Mechanical Engineering, 1997. 232 p. (In Russ.).
3. Mamontov A., Kitaev M., Molokov K., Surov O. Fatigue damage to vessels during operation in ice: evaluation of elastic deformations of the hull of the Project 498 tug in contact with ice. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2021;(3):49–56. (In Russ.). DOI: 10.24866/2227-6858/2021-3-6
4. DNVGL-CG-0129. Fatigue assessment of ship structures, DNV GL AS, 2018. 236 p.
5. ShipRight FDA ICE procedures. Fatigue Induced by Ice Loading, Lloyd's Register, 2010.
6. ShipRight FDA Procedures Overview, Lloyd's Register, 2007.
7. ShipRight FDA Fatigue Design Assessment procedures, Lloyd's Register, 2004.
8. Hobbacher A. Fatigue Design of Welded Joints and Components. Recommendations of IiW Joint Working Group XIII–XV, 128 p.
9. Zhang Sh. Fatigue Design Assessment of Ship Structures Induced by Ice Loading. An introduction to the ShipRight FDA ICE Procedure. London, Lloyd's Register, UK, 2011. 16 p.