Теория корабля и строительная механика

DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-3-6 УДК 629.12.001.2

А.И. Мамонтов, М.В. Китаев, К.А. Молоков, О.Э. Суров

МАМОНТОВ АНДРЕЙ ИГОРЕВИЧ – к.т.н., доцент (автор, ответственный за переписку), SPIN: 2422-8373, ORCID: 0000-0001-9350-9559, ScopusID: 56348967000, Andrew.Mamontov@outlook.com КИТАЕВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент, директор Департамента морской техники и транспорта, SPIN: 9464-6580, ResearcherID: S-3554-2018, ORCID: 0000-0001-5345-6333, ScopusID:16024898400, kitaev.mv@dvfu.ru MOЛOKOB KOHCTAHTИН АЛЕКСАНДРОВИЧ – к.т.н., доцент, SPIN: 4021-7431, Scopus ID: 57197836777, spektrum011277@gmail.com CУРОВ ОЛЕГ ЭДУАРДОВИЧ – к.т.н., доцент, SPIN: 3429-1822, surov.oye@dvfu.ru Политехнический институт Дальневосточный федеральный университет Владивосток, Россия

Усталостные повреждения судов при эксплуатации во льдах: оценка упругих деформаций корпуса буксирного судна проекта 498 при контакте со льдом

Аннотация: Представлены результаты численного и натурного экспериментов по оценке упругих деформаций корпуса буксирного судна проекта 498 при контакте со льдом. В результате натурного эксперимента, который проводился в сплошном ледяном поле и мелкобитом льду, определены параметры и характер действующих нагрузок для двух условий эксплуатации судна. С помощью численного эксперимента определен срок службы наиболее нагруженного узла до появления повреждений при эксплуатации судна в сплошном и мелкобитом льдах.

Ключевые слова: усталость, ледовая нагрузка, накопление повреждений, закон распределения вероятности размахов

Введение

Действие внешних факторов (ветра, волнения и льда) при эксплуатации судна создает переменное нагружение, что ведет к изменению структуры материала, накоплению усталостных повреждений и разрушению. Один из критериев прочности при выполнении практических расчетов – число циклов нагружения, выдерживаемое судовой конструкцией без разрушения.

Усталостью судовых конструкций в основном занималась школа Г.В. Бойцова [1]. Вопросы усталости, связанные с ледовой обстановкой, не нашли отражения в основных изданиях. За рубежом изданы нормативные документы 2004–2010 гг. При операциях судов во льдах усталостная долговечность может быть рассчитана согласно нормативам DNV GL [4–6, 8].

Цель настоящей работы – оценка влияния ледовой нагрузки на усталостную долговечность; наработка экспериментальных данных; проверка методики расчета усталостных повреждений при действии льда на корпус.

Для этого нам необходимо провести натурный и численный эксперименты на реальном судне, выполнить замеры перемещений бортовых конструкций во время операций портового буксира в сплошном и мелкобитом льду, рассчитать параметры ледовых нагрузок, а также

[©] Мамонтов А.И., Китаев М.В., Молоков К.А., Суров О.Э., 2021

Статья: поступила: 09.07.2021; рецензия: 19.07.2021; финансирование: Дальневосточный федеральный университет.

определить закон распределения вероятностей амплитуд и действующих напряжений. В конечном итоге мы полагаем определить прогнозируемый период времени, по истечении которого под воздействием расчетного спектра нагрузок может произойти усталостное разрушение.

Для прогнозирования усталостной долговечности судовых корпусных конструкций при контакте со льдом мы установили следующие параметры: закон распределения вероятности амплитуд напряжений, вызванных действием льда, период их действия и максимальное значение.

Натурный эксперимент

Натурный эксперимент проводился на портовом буксире-кантовщике пр. 498 (2017 г., район маяка «Токаревская кошка», Владивосток).

В форпике буксира в районе переменной ватерлинии на уровне интеркостельного стрингера были установлены акселерометры. Аппаратура считывает ускорения и пересчитывает их в перемещения путем двойного интегрирования.

Продольный разрез судна и места установки измерительного оборудования представлены на рис. 1.





Рис. 1. Эксперимент: а – продольный разрез и места установки измерительного оборудования, б – битый лед

Расчетная схема перекрытия с местами установки датчиков и результатами расчетов напряженно-деформированного состояния бортового перекрытия представлены на рис. 2 (по-казаны перемещения при давлении 4.6 МПа).



Рис. 2. Расчетная схема перекрытия

При проведении эксперимента скорость судна изменялась от 6 до 1 м/с при разных толщинах сплошного ледяного поля от 5 до 20 см.

Графики деформаций конструкций корпуса в точках установки датчиков в течение времени блока показаны на рис. 3 (блок нагружения – это взаимодействие корпуса со льдом в течение времени записи сигнала [1]). По оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат – перемещения в метрах. Серым, желтым, оранжевым и голубым показаны осциллограммы перемещений обшивки. Синим цветом показан график, построенный по показаниям, полученным в районе верхнего пояска стрингера.

В разные моменты времени пики ледовой нагрузки возникают в разных местах бортового перекрытия. Рисунок 3 иллюстрирует, что максимумы (пики) перемещений не совпадают во времени в соседних шпациях: давление от льда носит пиковый характер. Сплошное ледяное поле при контакте с корпусом ломается неравномерно. Каждый пик нагрузки соответствует локальному слому кромки ледового поля и создает перемещения конструкций в пределах одной шпации. В соседних участках в районе смежных шпаций перемещения общивки незначительные.



Рис. 3. Графики перемещений в точках установки акселерометров: синий – стрингер; остальные – обшивка

Для того чтобы по перемещениям определить параметры нагрузки, создана трехмерная модель для выполнения численных расчетов МКЭ (см. рис. 2). Нагрузки при моделировании приняты для фиксированного момента времени. Основным источником моделирования давления служит прогиб общивки в месте установки датчиков; в соседних шпациях перемещение в этот момент отсутствует, а на стрингере оно равно 2 мм.

В результате эксперимента определено давление и его локализация. Перемещение обшивки толщиной 8 мм составило 16 мм, 0 мм – в соседней шпации, эта же нагрузка создает перемещение стрингера (несимметричный полособульб № 20б) до 2 мм. Решение задачи МКЭ получено для давления 4.6 МПа, которое было равномерно распределено на площадь размерами 0.3×0.4 м между двумя соседними шпангоутами.

Расчет усталостной долговечности основан на оценке напряжений в судовых конструкциях. Одним из слабых мест бортового перекрытия является узел соединения шпангоута с флором в районе днища (см. рис. 4). Приложив нагрузку в 4.6 Мпа, мы получили напряжения 500 МПа в этом узле соединения.

При расчетах МКЭ напряжения могут быть больше предела текучести материала, но физически это невозможно. Часть узла, в которой напряжения по результатам расчета МКЭ выше предела текучести, охвачена пластическими деформациями, т.е. узел работает в упругопластической стадии.

Для прогноза времени работы узла в той части, где напряжения равны пределу текучести, был принят рассчитанный нами закон распределения вероятности размахов перемещений в масштабе напряжений, который представлен на рис. 5. В основу принятого закона положен тот факт, что максимальные перемещения конструкций соответствуют максимуму напряжений, или пределу текучести материала. Например, для стали ст3 составляют 235 МПа. Так, синяя линия на рис. 2 представляет собой перемещения стрингера. Максимальному прогибу соответствуют максимальные напряжения 235 МПа.



Рис. 4. а – узел расчета усталостных повреждений. Соединение шпангоута с флором: 1 – шпангоут, 2, 3 – флор; б – акселерометры на обшивке и стрингерах

Для построения функции распределения вероятности напряжений применялся метод размахов, описанный в [2]. Распределение вероятности размахов напряжений в узле судового корпуса (см. рис. 4), показано на рис. 5.



Рис. 5. Закон распределения вероятности размахов перемещений в масштабе напряжений

Данные численного эксперимента на рис. 5 отмечены черными точками.

Определим закон распределения размахов и его параметры.

Предположим, что распределение размахов напряжений при действии ледовой нагрузки подчиняется закону Вейбулла (1).

В общем виде он выглядит следующим образом [3]:

$$Q(\Delta\sigma) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^{\xi}\right),\tag{1}$$

где

q – масштабный коэффициент,

ξ – параметр распределения.

При значениях параметров q = 35.5 и ξ = 0.906 (см. рис. 5) оранжевый график совпадает с данными натурного эксперимента, поэтому эти значения можно использовать для расчета усталостной долговечности узлов судового корпуса.

Чтобы прогнозировать усталостные повреждения, следует определить период действия нагрузки и число циклов за определенное время, например за 1 год.

Время блока 290 с. На основании (1) число циклов в блоке или число черных точек на рис. 5 найдем по формуле

$$n_0 = e^{\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^{\xi}} = e^{\left(\frac{235}{35.5}\right)^{0.906}} \approx 256,$$
 (2)

где $\Delta \sigma = 235$ – максимальные напряжения в судовой конструкции, МПа;

Среднее время разрушения кромки льда найдем делением времени блока на число циклов в блоке

$$T_{av} = \frac{290}{256} \approx 1.133 \,\mathrm{c} \,, \tag{3}$$

Число циклов нагружения за 1 год составит:

 $N = 2.78 \cdot 10^7$;

где

Повреждения определяются по следующей формуле [3]:

$$D = \frac{N}{K_{2}} \cdot \frac{\Delta \sigma^{m}}{(\ln(n_{0}))^{\frac{m}{\xi}}} \cdot \mu \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) = \frac{2.78 \cdot 10^{7}}{10^{12.164}} \cdot \frac{235^{3}}{\ln(256)^{3/0.906}} \cdot \mu \cdot 6 = 7.54; \quad (4)$$

$$\mu = 1 - \frac{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu\right) - \nu^{-\Delta m/\xi}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)} = \frac{2.78 \cdot 10^{7}}{\ln(256)^{3/0.906}} \cdot \mu \cdot 6 = 7.54; \quad (4)$$

$$\mu = 1 - \frac{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu\right) - \nu^{-\Delta m/\xi}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)} = 0.985; \quad \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$$

$$\nu = \left(\frac{\Delta \sigma_{q}}{\Delta \sigma}\right)^{\frac{\xi}{\xi}} \cdot \ln\left(n_{0}\right) = \left(\frac{52.63}{235}\right)^{0.906} \cdot 5.545 = 1.43; \quad - \text{параметр распределения Вейбулла;} - \mu \text{исло циклов за 1 год эксплуатации;} - paзмах напряжений, MПа; \quad - paзмах напряжений, MПа; \quad - \text{параметры S-N кривой на 2-м участке [7];} \\ K_{3} = 10^{15.606}, m + \Delta m = 5 \quad - \text{параметры S-N кривой на 3-м участке;} \\ \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) = \Gamma\left(1 + \frac{3}{0.906}\right) = 9 \quad - \text{полная гамма-функция;} \\ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu\right) = \gamma\left(1 + \frac{3}{0.906}, 1.43\right) \approx 0.35 \quad - \text{неполная гамма-функция;}$$

$$\gamma\left(1+\frac{5}{0.906},1.43\right) \approx 0.46$$
 – неполная гамма-функция;

 $\Delta \sigma_q = 52.63$ – размах напряжений, МПа, соответствующий пересечению двух сегментов S–N кривой.

При эксплуатации судна в сплошном льду узел соединения шпангоута с флором получает усталостные разрушения D = 7.54, что больше 1. Через 1/7.54 = 0.133 года, или 1162 ч эксплуатации судна рассматриваемый узел разрушится.

После проведения первого натурного эксперимента судно развернулось и шло в мелкобитом льду.

График перемещений бортовой общивки при движении судна в мелкобитом льду представлен на рис. 6.

Рисунок 6 показывает: максимальные перемещения общивки равны 1.6 мм, что в 10 раз меньше, чем в сплошном льду. Пропорционально уменьшаются и напряжения. Так как расчет был линейный, то максимум напряжений составляет 50 МПа.

Изменился и характер действующей нагрузки, поэтому меняется закон распределения размахов напряжений. Распределение вероятности размахов напряжений представлено на рис. 7.







40

50

Время блока нагружения и время записи сигнала составляет 390 с. Параметры закона распределения приняты следующие: q = 14.1 и $\xi = 1.56353$.

Расчеты накопления повреждений при работе судна в мелкобитом льду выполним аналогично предыдущим.

$$n_0 = e^{\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^{\xi}} = e^{\left(\frac{50}{14.1}\right)^{1.56353}} \approx 1390,$$
(5)

где

 $\Delta \sigma = 50$ – максимальные напряжения в судовой конструкции, МПа.

Среднее время разрушения кромки льда найдем делением времени записи результатов (время блока нагружения) на число нагружений:

$$T_{av} = \frac{390}{1390} \approx 0.28 \,\mathrm{c} \,, \tag{6}$$

Число циклов нагружения за 1 год составит

 $N = 1.1263 \cdot 10^8$;

Малоцикловые повреждения определяются по следующей формуле [3]:

$$D = \frac{1.1263 \cdot 10^8}{10^{12.164}} \cdot \frac{50^3}{\ln(1390)^{3/1.56353}} \cdot \mu \cdot 6 = 0.119;$$

$$\Gamma \mu = 1 - \frac{\gamma \left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu\right) - \nu^{-\Delta m/\xi} \cdot \gamma \left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu\right)}{\Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi}\right)} = 0.296;$$

$$\nu = \left(\frac{\Delta \sigma_q}{\Delta \sigma}\right)^{\xi} \cdot \ln(n_0) = \left(\frac{52.63}{50}\right)^{1.56353} \cdot 7.237 = 7.841;$$

$$\Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi}\right) = \Gamma \left(1 + \frac{3}{1.56353}\right) = 1.858; \quad \gamma \left(1 + \frac{3}{1.56353}, 7.841\right) \approx 1.832;$$

$$(7)$$

$$\gamma\left(1+\frac{5}{1.56353}, 7.841\right) \approx 7.296;$$

Накопление повреждений за 1 год D=0.119, за 24 года D=2.856. Так как ледовая проводка осуществляется не более чем 3 месяца, то за 24 года накопится D/24=0.714 повреждений. То есть при непрерывной работе в битых льдах буксир может работать 24 года и более.

Заключение

Итак, в настоящей работе представлены результаты натурного и численного экспериментов на реальном судне, проведены замеры перемещений бортовых конструкций во время операций портового буксира в сплошном и мелкобитом льду и получены соответствующие осциллограммы реакции конструкций на внешние воздействия. При помощи численного моделирования взаимодействия конструкций судна со льдом, выполненного МКЭ, получены параметры ледовых нагрузок, закон распределения вероятностей амплитуд и действующих напряжений. Определен прогнозируемый период времени, по истечении которого под воздействием расчетного спектра нагрузок может произойти усталостное разрушение.

Время службы по условиям усталостных повреждений в основном зависит от типа процесса взаимодействия корпуса со льдом – со сплошным или битым – и от максимального размаха. В битом льду размахи напряжений незначительные, так как нет слома кромки, время службы узлов судового корпуса превышает проектный срок.

В сплошном льду размах напряжений на порядок выше, чем в битом. Накопление повреждений резко возрастает, и срок службы уменьшается на порядок. Максимальный размах в основном зависит от толщины ледяного покрова и соответствует давлению 4.6 МПа на площади контакта 0.3x0.4 м. Средний период действия такой нагрузки составляет около 1 с.

4.6 МПа – значительное давление. По ряду оценок, при таком давлении лед разрушается на смятие, хотя этот предел может возрастать при увеличении скорости и других параметров. Такое давление вызывает предел текучести в отдельных частях судовых конструкций. Как по-казал расчет МКЭ, предел текучести был превышен локально – в месте концентрации напряжения и соединения шпангоута с флором.

Переход части конструкции в пластическое состояние должен уменьшать прочность и развивать деформации. В эксперименте не наблюдается значительных пластических деформаций корпуса. Это может быть следствием восстановления несущей способности из-за физического и геометрического упрочнения.

Тем не менее циклическое воздействие льда изменяет структуру металла, ведет к снижению несущей способности и развитию одного из возможных сценариев отказа через определенное время: возникновению трещин или глубоких пластических повреждений.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бойцов Г.В. Вероятностные методы в расчетах прочности и надежности судовых конструкций. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2007. 263 с.
- 2. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1997. 232 с.
- 3. Международный стандарт. Оценка усталости судовых конструкций. Нормативно-технический материал. DNV GL AS, 2018. 236 с.
- 4. Нормативы ShipRight FDA ICE. Усталость, вызванная ледовой нагрузкой: Регистр Ллойда, 2010.
- 5. Обзор нормативов ShipRight FDA: Регистр Ллойда, 2007.
- 6. Проверка конструкции на усталость FDA ShipRight: Регистр Ллойда, 2004.
- 7. Хоббахер А. Расчет сварных соединений и деталей на усталость. Рекомендации совместной рабочей группы XIII–XV. 128 с.
- 8. Чжан Ш. Расчетная усталостная оценка судовых конструкций, вызванная ледовой нагрузкой. Введение в процедуру ShipRight FDA ICE: Регистр Ллойда, 2011. 16 с.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2021. N 3/48 *Theory of the Ship and Construction Mechanics*

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-3-6

Mamontov A., Kitaev M., Molokov K., Surov O.

ANDREY MAMONTOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor (Corresponding Author), ORCID: 0000-0001-9350-9559, ScopusID: 56348967000, Andrew.Mamontov@outlook.com MAKSIM KITAEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Department, ResearcherID: S-3554-2018, ORCID: 0000-0001-5345-6333, ScopusID: 16024898400, kitaev.mv@dvfu.ru KONSTANTIN MOLOKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, ScopusID: 57197836777, spektrum011277@gmail.com OLEG SUROV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, surov.oye@dvfu.ru Polytechnic Institute, *Far Eastern Federal University* Vladivostok, Russia

Fatigue damage to vessels during operation in ice: evaluation of elastic deformations of the hull of the Project 498 tug in contact with ice

Abstract: Presented in the work are the results of numerical and field experiments to assess the elastic deformations of the hull of a Project 498 Tug upon contact with ice. As a result of a full-scale experiment, which was carried out both in solid ice field and small-sized ice field, parameters and nature of the actual loads were determined for both types of operating conditions. Using the numerical experiment method, the fatigue life of the most affected section of the vessel was determined until damage occurs during the vessel's operation in solid and small-sized ice fields.

Keywords: fatigue, ice load, total predicted fatigue damage, probability distribution

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts 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.
- 2. Kogaev V. Strength calculations for time-dependent stresses. Moskow, Mechanical Engineering, 1997, 232 p.
- 3. DNVGL-CG-0129. Fatigue assessment of ship structures, DNV GL AS, 2018, 236 p.
- 4. ShipRight FDA ICE procedures Fatigue Induced by Ice Loading, Lloyd's Register, 2010.
- 5. ShipRight FDA Procedures Overview, Lloyd's Register, 2007.
- 6. ShipRight FDA Fatigue Design Assessment procedures, Lloyd's Register, 2004.
- 7. Hobbacher A. Fatigue Design of Welded Joints and Components. Recommendations of Iiw Joint Working Group XIII–XV, 128 p.
- 8. 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.