Теория корабля и строительная механика

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-6>

УДК 629.12:621

Г.В. Матохин, К.А. Молоков, В.В. Новиков, А.П. Герман

МАТОХИН ГЕННАДИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – д.т.н., профессор, e-mail: matohin@bk.ru

МОЛОКОВ КОНСТАНТИН АЛЕКСАНДРОВИЧ – к.т.н., доцент, AuthorID: 743048,

SPIN: 4021-7431, ScopusID: 57197836777, e-mail: spektrum011277@gmail.com

Кафедра сварочного производства Инженерной школы

НОВИКОВ ВАЛЕРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, AuthorID: 1036802, SPIN: 7257-7822;

Scopus ID: 5641710410, e-mail: Leka1551@rambler.ru

ГЕРМАН АНДРЕЙ ПЕТРОВИЧ – доцент кафедры кораблестроения и океанотехники

Инженерной школы, AuthorID: 742645, SPIN: 3840-7584, ORCID: 0000-0002-9530-5258,

ScopusID: 56417290300, e-mail: german.ap@dvfu.ru

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, Россия, 690091

Математическая модель определения эксплуатационного ресурса судовых конструкций

Аннотация: Эксплуатационный ресурс конструкций корпуса морского судна зависит от многих технико-экономических факторов. Большое влияние на работоспособность и долговечность оказывают микродефекты стали, которые при циклических нагрузках приводят к возникновению структурной поврежденности металла, малоцикловой или многоцикловой усталости и распространению трещин в связях корпуса, особенно в сварных соединениях. Расчетные методики оценки остаточного ресурса предполагают использование гипотетической скорости развития микротрещины, которая во многих случаях неизвестна и не всегда поддается точному экспериментальному определению. Предлагаемый в работе авторский способ определения её начальной скорости основан на аналитическом подходе, использующем известное расчетное или экспериментальное значение предела выносливости феррито-перлитной стали и рассматривающем решение задачи совместно для двух первых участков кинетической диаграммы усталостного разрушения. Для реализации предложенного способа разработана математическая модель, которая позволяет использовать приближенный инженерный подход для определения остаточного усталостного ресурса судовых конструкций и их сварных соединений.

Ключевые слова: ресурс конструкции, феррито-перлитная сталь, микротрещина, макротрещина, кинетика разрушения, уравнение Пэриса, предел выносливости.

Введение

Известно, что эксплуатационный ресурс сварных конструкций в значительной степени зависит от наличия в металле микродефектов, которые при циклических нагрузках развиваются и приводят к возникновению усталостных трещин [1, 16]. Эти трещины в условиях

сложного напряженного состояния часто распространяются по хрупкому или квазихрупкому механизмам разрушения [5, 6].

Хрупкое разрушение конструкций характерно для элементов, изготовленных из хрупких материалов, например чугуна. Однако оно может наблюдаться и в конструкциях из материалов, которые при обычных испытаниях на растяжение показывают достаточную пластичность (конструкционные стали, сплавы алюминия и др.). В стальных конструкциях при температурах ниже температуры хладноломкости стадия квазихрупкого разрушения сокращается или может практически отсутствовать [7]. Известны также результаты влияния циклической наработки трубопроводов из малоуглеродистых сталей на снижение сопротивления хрупкому разрушению [15].

В конструкциях судов даже после нескольких лет эксплуатации из-за малоциклового усталости часто появляются многочисленные трещины в местах повышенной концентрации напряжений, жестких точках, в местах пересечения балок и пр. [1]. Примерами возникновения таких трещин могут служить повреждения сильно нагруженных конструкций судов смешанного плавания, эксплуатирующихся и в море, и в реках [4]. В конструкциях морских судов появление трещин нередко может быть вызвано усталостью от вибрационной нагрузки при слеминге или общей вибрацией корпуса на волнении [1].

Повреждения в результате малоциклового усталости могут возникать в первые же годы эксплуатации судов в штормовых условиях в наиболее напряженных конструкциях. Конструкции менее напряженные, но имеющие дефекты материала или микродефекты в сварных швах, некоторое время продолжают накапливать усталостные повреждения, которые в какой-то период времени проявляются в виде трещин [3]. Статистические данные свидетельствуют, что на танкерах максимальное число повреждений вследствие воздействия вибрации накапливается примерно к девяти годам эксплуатации (рис. 1).

Рис. 1. Количество повреждений от вибрации: 1 – набор судов, перевозящих генеральные грузы; 2 – поперечный набор днища танкеров; 3 – набор переборок танкеров [10].

Кроме того, частота повреждений набора корпуса судна грузовых трюмов разных типов судов также зависит от их возраста (рис. 2). После 8 лет эксплуатации частота повреждений на лесовозах, навалочниках и обычных сухогрузных судах почти одинакова. Но затем, после 8–12 лет эксплуатации, число повреждений растёт только на лесовозах и навалочниках. Максимум повреждений у всех типов судов наблюдается к 12 годам эксплуатации.

Стадия образования макротрещины в конструкционных сталях, как правило, связана с накоплением кумулятивных повреждений. Процесс их накопления отражается очевидным образом на результатах анализа микроструктуры материала. На рис. 3 показана структура металла в листах палубы большого танкера. Снимки иллюстрируют: после длительной эксплуатации

возникает структурная поврежденность стали, приводящая к её охрупчиванию [4]. Основной причиной подобных повреждений судовых конструкций может являться как мало-, так и многоцикловая усталость, связанная с повышенными уровнями циклических напряжений, возникающих в местах концентрации напряжений при тяжелых погодных условиях эксплуатации.

Рис. 2. Повреждение набора грузовых трюмов:
1 – обычное сухогрузное судно; 2 – лесовоз; 3 – навалочник; f – частота повреждений;
 t – годы эксплуатации [10].

Рис. 3. Микроструктура корпусной стали [4]:
в исходном состоянии (а) и после эксплуатации (б); образование строчечной
феррито-перлитной микроструктуры (в) образца стали (увеличение $\times 500$).

Результаты исследований и численного анализа показывают сильный разброс экспериментально определенных скоростей развития трещин в предпороговой области кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР). Это затрудняет использование уравнения Пэриса для этой области [11]. Однако попытки по их определению предпринимались, были получены конкретные результаты в этом направлении. Описание средней области КДУР по современному состоянию исследований получено на использовании зависимости Пэриса. Эти исследования основаны на данных структурных характеристик и комплексе стандартных механических характеристик феррито-перлитной стали [9]. Расчетным путем описать стадию развития коротких трещин в связи со структурными данными материала до настоящего времени не удаётся [12, 14]. Однако для инженерных расчетов может быть получен и использован приближенный метод оценки ресурса, если известна начальная (гипотетическая) скорость развития микротрещины. Предположим, что такая начальная скорость должна энергетически соответствовать определенному количеству циклов до образования начальной макротрещины. Предлагаемый подход можно осуществить для известного расчетного значения предела выносливости, если рассматривать совместную задачу для двух первых участков диаграммы КДУР.

Целью данного исследования является получение способа определения начальных скоростей трещинообразования и разработка соответствующей математической модели для оценки остаточного ресурса сварных конструкций.

Описание способа определения начальной скорости усталостной трещины в рамках математической модели развития трещины

Предельные напряжения и циклы до разрушения оцениваются на базе кинетических закономерностей развития трещины. В общем виде для материала при переменном нагружении зависимость скорости роста dL/dN усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности ΔK в логарифмических координатах представляется кривой, состоящей из трех областей. Докритическое устойчивое развитие (стабильное) происходит в области 1 и 2. Область 3 характерна для критического ускоренного развития. В этой области развитие трещины нестабильно и имеет максимальную скорость. Отметим известный факт: в области 2 поведение кривой в логарифмических координатах приобретает характер прямой, где она хорошо коррелирует с экспериментальными данными.

Область 1 соответствует значениям ΔK , при которых гипотетическая трещина длиной l_0 для малоуглеродистых сталей растет: по одним данным [2], со скоростями $2,5 \cdot 10^{-10} \div 2,5 \cdot 10^{-11}$ м/цикл, по другим [11] – $10^{-8} \div 10^{-9}$ м/цикл. Введем обозначение «стартовой» скорости V_{l_0} для этой гипотетической микротрещины, присутствующей в материале. Точка со значением этой скорости соответствует начальному размаху коэффициента интенсивности напряжений с нулевой асимметрией цикла K_{l_0} КДУР. Значение коэффициента интенсивности напряжений в ней может быть вычислено в соответствии с зависимостью

$$K_{l_0} = \sigma_{1\max} \times M \times \sqrt{\pi \times l_0}, \quad (1)$$

где M – коэффициент поправки на форму трещины; $\sigma_{1\max}$ – напряжение внешней нагрузки отнулевого цикла.

Поведение распространения трещины, особенно начало стабильного ее распространения в области 2, представляет практический интерес, так как это поведение характеризует окончание первой стадии развития трещины. Переход трещины в стабильное состояние для углеродистой стали происходит при скоростях $V_{th} = (1 \div 9) \times 10^{-9}$ м/цикл и $V_{th} = 5 \times 10^{-8}$ м/цикл соответственно. Переход в стабильное состояние трещины нормального отрыва будет характеризоваться коэффициентом интенсивности напряжений $K_{1\max}$ и условием

$$K_{1\max} = K_{th0}, \quad (2)$$

где K_{th0} – пороговый коэффициент интенсивности напряжений, значение которого соответствует началу второй стадии разрушения.

Согласно модели развития трещины по Дж. Си и по структурным зависимостям [8], трещина делает пороговый скачок, равный r_{th0} . Он зависит от размера зерна d_g феррито-перлитной стали и критического коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} и K_{th0} . Начало стабильного разрушения и совершение порогового скачка требуют накачки энергии, которая зависит от количества циклов. Количество циклов, влияющих на увеличение размеров трещины, асимптотически убывает на всем протяжении разрушения через все его стадии. Следовательно, определив необходимую пороговую критическую энергию для накачки в виде количества циклов, можно найти скорость в момент порогового скачка трещины.

Рассмотрим случай, когда нагрузка действует в поперечном направлении от распространения трещины, и запишем уравнение Пэриса для первого участка в следующей известной форме [14]:

$$\frac{dL}{dN} = B \times \left(\frac{\Delta K_1}{K_{th0}} \right)^m = B \times \left(\frac{K_{1\max} \times (1 - r)}{K_{th0}} \right)^m, \quad (3)$$

где B – постоянная материала имеет размерность длины; m – показатель степени, константа материала, определяемая по экспериментальным кривым роста трещины; K_{th0} – пороговый коэффициент интенсивности напряжений; $r = K_{1min}/K_{1max}$ – коэффициент асимметрии цикла. Для нахождения коэффициентов B и m воспользуемся узловыми точками начала и окончания первой области КДУР. Для этого, согласно условиям окончания и начала первой области диаграммы (граничным условиям для первого участка), подставим в (3) скорость V_{th} и условие (2) и V_{l0} и K_{l0} соответственно. Запишем скорости системой уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} V_{l0} = B \times \left(\frac{K_{l0} \times (1 - r)}{K_{th0}} \right)^m \\ V_{th} = B \times (1 - r)^m. \end{cases} \quad (4)$$

Решая систему (4) относительно неизвестных B и m , получаем

$$\begin{cases} m = \log_{\left(\frac{K_{l0}}{K_{th0}}\right)} \left(\frac{V_{l0}}{V_{th}} \right); \\ B = V_{l0} / (1 - r)^m, \end{cases} \quad (5)$$

где V_{th} и $V_{l0} = (2,5 \cdot 10^{-9} \dots 2,5 \cdot 10^{-11})$ м/цикл – скорость в конце первой стадии разрушения и гипотетическая скорость начала накопления поврежденности соответственно. Скорость V_{th} является постоянной для данного материала и напрямую зависит от его структуры, в то время как V_{l0} определена диапазоном скоростей и в рамках детерминистического подхода не может быть найдена. Вероятно, V_{l0} и V_{th} могут коррелировать через параметр структуры материала d_g так, что кривая КДУР будет наилучшим образом описывать экспериментальные данные. То есть равенство $V_{l0}/d_g = \text{const}$ описывает экспериментальные данные, например для класса феррито-перлитных сталей.

Подставляя значения коэффициентов из (5) в (3), получаем расчетное кинетическое уравнение для описания первого участка КДУР. В (3) K_{1max} зависит от коэффициента поправки на форму трещины, максимальных напряжений и длины трещины и записывается известным выражением

$$K_{1max} = M \times \sigma_{1max} \sqrt{\pi l}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3) с использованием коэффициентов из (5) и проинтегрировав полученное уравнение по длине трещины $l_0 \div L_{min}$, можно рассчитать количество циклов N_I для подрастания трещины в этом диапазоне при стационарном режиме циклического нагружения:

$$N_I = \int_{l_0}^{L_{min}} \frac{1}{B} \left(\frac{M \times \sigma_{1max} \sqrt{\pi l} \times (1 - r)}{K_{th0}} \right)^{-m} dl, \quad (7)$$

где K_{th0} и M – коэффициент, вычисляемый согласно [8], и коэффициент поправки на форму трещины, принимаемый для поверхностных трещин 0,9 [13, с. 434], который зависит от толщины металла и глубины трещины. Для расчета количества циклов N_I первообразная функция будет выглядеть аналогично полученной в [9].

Начало стадии устойчивого развития сравнительно четко определено скоростью и критическими характеристиками структурной модели разрушения и малой чувствительностью (7) к области, где трещина имеет пороговую величину. В области минимальных микротрещин начальная скорость V_{l0} развития трещины на основе вполне определенных критериев или физико-механических характеристик сталей точно не определена. Отметим, что выражение (7) достаточно «чувствительно» к начальной длине трещины l_0 . Поэтому от неё будет сильно зависеть получаемое количество циклов на первой стадии разрушения.

Ресурс материала на этапе стабильного развития трещины легко вычисляется после нахождения первообразной в (7). На первой стадии ресурс будет представлять собой разность

$$N_I = N(L_{\min}) - N(l_0), \quad (8)$$

из которой можно определить V_{I0} , если положить $N_I + N_{II} = 2 \cdot 10^8$ циклов (базовое значение) на пределе выносливости, где N_{II} – величина известная.

Также следует отметить, что при разных скоростях порогового развития макротрещины характерная скорость $V_{th} = 10^{-9}$ м/цикл и соответствующая ей длина трещины являются константой для данного материала или, возможно, группы сталей феррито-перлитного класса.

Второй способ определения V_{I0} может быть основан на концепции критической плотности энергии упругой деформации, предложенной Дж. Си (см. [8, с. 129]). Найдем гипотетический шаг микротрещины r_{thl0} размером l_0 . Для этого используем известное пороговое значение шага $r_{th} = 0,618 \times d_g$, а из выражения $r_{thl0}/r_{th} = (K_{I0}/K_{th0})^2$ получаем формулу

$$r_{thl0} = r_{th} \times (K_{I0}/K_{th0})^2 \quad (9)$$

и после подстановки и сокращений окончательно имеем:

$$r_{thl0} = 0,618 \times d_g \times (K_{I0}/K_{1c})^2. \quad (10)$$

Таким образом, представленные новые зависимости (5), (9), (10) позволяют получить значения начальных скоростей развития трещин, используемых в предлагаемой нами математической модели оценки остаточного ресурса металлических конструкций при циклических нагрузках (4), (5).

Заключение

Итак, мы предложили способ определения начальной скорости микротрещин, рассмотрев решение задачи совместно для двух первых участков кинетической диаграммы усталостного разрушения. Для реализации предложенного способа разработана математическая модель, которая позволяет использовать приближенный инженерный подход для определения остаточного усталостного ресурса судовых конструкций и их сварных соединений.

Аналитически установлено, что начальная стадия образования повреждений носит случайный характер, однако могут быть найдены критерии и способы, позволяющие расчетным путем и усреднением получать приемлемые результаты описания первой стадии диаграммы усталостного разрушения для физически коротких трещин.

Показано, что стадии микро- и макроразрушения связаны, а отношение длительности этих стадий меняется в зависимости от характеристик и уровня нагрузок, а также от структурно-механических характеристик материала.

На основе структурно-механических критериев и линейной механики разрушения нами разработана инженерная методика расчета ресурса работы феррито-перлитных сталей при циклических нагрузках. Отличительной особенностью является то, что предложенные нами расчетный метод и математическая модель относительно просты и могут применяться в конструкторской практике для приближенной оценки количества циклов до разрушения при многоциклового усталости судовых, машиностроительных и других металлических конструкций. Результаты настоящей статьи могут быть использованы для оценки ресурса работы материала в зоне механической и структурной неоднородности сварных соединений.

В связи с этим направление наших дальнейших исследований – разработка комбинированных методов оценки ресурса металлоконструкций, включающих как детерминистическую, так и стохастическую составляющую.

Вклад авторов в статью: Г.В. Матохин – постановка цели исследования, анализ результатов, общий контроль; К.А. Молоков – решение задач исследования, получение и анализ результатов моделирования, работа с текстом; В.В. Новиков – подборка экспериментальных данных, анализ результатов, работа с текстом; А.П. Герман – подборка экспериментальных данных, работа с источниками, работа с текстом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аносов А.П. Термодинамические аспекты циклической прочности судостроительных сталей: монография. Владивосток: Издат. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. 348 с.
2. Бьюи Х.Д. Механика разрушения: обратные задачи и решения. М.: Физматлит, 2011. 412 с.
3. Герман А.П. Эксплуатационные факторы в модели оценки усталостной долговечности корпусов судов // Морские интеллектуальные технологии. 2011. № S1. С. 64–66. eLIBRARY ID: 23214379.
4. Казанов Г.Т., Новиков В.В., Турмов Г.П. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций: монография. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2014. 178 с.
5. Корнев В.М. Диаграммы квазихрупкого разрушения при усталости (двухчастотное нагружение) // Физ. мезомех. 2012. № 6(15). С. 45–58.
6. Корнев В.М. Критические кривые разрушения и эффективный диаметр структуры хрупких и квазихрупких материалов // Физ. мезомех. 2013. № 5(16). С. 25–34.
7. Корнев В.М. Распространение усталостных трещин и разрушение стальных конструкций при температурах ниже порога хладноломкости // Полярная механика: материалы третьей междунар. науч. конф., 27–30 сентября 2016, Владивосток / науч. ред. А.Т. Беккер; Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. С. 707–717. 1 CD. URL: <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/5bc/PolarMechanics.pdf> (дата обращения: 09.10.2019).
8. Матохин Г.В., Горбачев К.П. Инженеру о сопротивлении материалов разрушению. Владивосток: Дальнаука, 2010. 281 с.
9. Молоков К.А., Домашевская Я.Р. Оценка ресурса сварных соединений из феррито-перлитных материалов в условиях низких температур // Полярная механика: материалы третьей междунар. науч. конф., 27–30 сентября 2016, Владивосток / науч. ред. А.Т. Беккер; Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. С. 618–628. 1 CD. URL: <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/5bc/PolarMechanics.pdf> (дата обращения: 09.10.2019).
10. Повреждения и пути совершенствования судовых конструкций / Н.В. Барабанов, Н.А. Иванов, В.В. Новиков, Г.П. Шемендюк. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
11. Файвисович А.В., Чура М.Н. Приближенный метод оценки продолжительности начальной стадии усталостного разрушения судовых гребных валов // Транспортное дело России. 2011. № 10. С. 79–80.
12. Федотов С.Н. Квазихрупкое разрушение как разрушение иерархической структуры // Физ. мезомех. 2015. № 6(18). С. 24–31.
13. Хажинский Г.М. Деформирование. Разрушение. Надежность: задачи деформирования и разрушения стали. Методы оценки прочности энергетического оборудования и трубопроводов. М.: Ленанд, 2014. 544 с.
14. Хажинский Г.М. Механика мелких трещин в расчетах прочности оборудования и трубопроводов. М.: Физматкнига, 2008. 256 с.
15. Ямалеев К.М., Гумерова Л.Р. Структурные аспекты разрушения металла нефтепроводов. Уфа: Гилем, 2011. 144 с.
16. Kazanov G.T., Novikov V.V., Antonenko S.V., Melnik V.V., Shemendjuk G.P. Full and residual resources of steel ship's hull in view of its damages from cyclically variable and long-lived actions of wave loadings. The 21st Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM 2007. Yokohama, Japan, 10–13 Sept., 2007, p. 105–109.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-6>

Matokhin G., Molokov K., Novikov V., German A.

GENNADY MATOKHIN, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: matokhin@bk.ru
 KONSTANTIN MOLOKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
 ScopusID: 57197836777, e-mail: spektrum011277@gmail.com
 Department of Welding, School of Engineering
 VALERY NOVIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
 Scopus ID: 5641710410, e-mail: Leka1551@rambler.ru
 ANDREY GERMAN, Associate Professor, ORCID: 0000-0002-9530-5258,
 Scopus ID: 56417290300, e-mail: german.ap@dvfu.ru
 Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, School of Engineering
Far Eastern Federal University
 8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Mathematical model for determining the operational life of ship structures

Abstract: The operational resource of the hull structure of a marine vessel depends on many technical and economic factors. Microdefects of steel, which under cyclic loads lead to the occurrence of structural damage to the metal, low-cycle or high-cycle fatigue and the propagation of cracks in the hull braces, especially in welded joints, have a great influence on the capacity and durability. Estimation methods for calculation of residual life involve the use of a hypothetical rate of microcrack development, which is unknown (in many cases) and cannot be always measured with any experimental degree of accuracy. The proposed in this paper author's method of determination its initial velocity is based on an analytical approach which uses the well known calculation or evaluation value of the endurance limit of ferrite-pearlite steel and considering in order to solve problems of the joint for the first two parts of the kinetic diagram of fatigue fracture. The developed mathematical model for carrying out the proposed method allows us to use an approximate engineering approach to determine the residual fatigue life of ship structures and its welded joints.

Keywords: structural resource, ferrite-pearlite steel, microcrack, macrocrack, fracture kinetics, Paris equation, endurance limit.

REFERENCES

1. Anosov A.P. Thermodynamic aspects of the cyclic strength of shipbuilding steels: monograph. Vladivostok, Far Eastern Federal Univ., 2012, 348 p.
2. Bui H.D. Fracture mechanics: inverse problems and solutions. M., Fizmatlit, 2011, 412 p.
3. German A.P. Operational Factors in Fatigue Life of Ship Hulls Estimation Model. Marine Intellectual Technologies. 2011;S1:64-66. eLIBRARY ID: 23214379.
4. Kazanov G.T., Novikov V.V., Turmov G.P. Stress concentration and other features of the stress state of ship hull structures: monograph. Vladivostok, Far Eastern Federal Univ., 2014, 178 p.
5. Kornev V.M. Diagrams of quasi-brittle fracture during fatigue (two-frequency loading). Physical Mesomechanics. 2012(15):45–58.
6. Kornev V.M. Critical fracture curves and effective diameter of the structure of brittle and quasi-brittle materials. Physical Mesomechanics. 2013(16):25–34.
7. Kornev V.M. The propagation of fatigue cracks and the destruction of steel structures at temperatures below the cold brittleness threshold. Proceedings of the Third Intern. Scientific Conf. Polar Mechanics. Vladivostok, Russia, September 27–30, 2016. Scientific ed. A. Becker, School of Engi-

- neering FEFU. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 2016, p. 707–716. URL: <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/5bc/PolarMechanics.pdf> – 09.10.2019.
8. Matokhin G.V., Gorbachev K.P. Engineer on the resistance of materials to destruction. Vladivostok, Dalnauka, 2010, 281 p.
9. Molokov K.A., Domashevskaya Ya.R. Resource assessment for welded joints of ferrite-perlite materials under low temperature conditions. Proceedings of the Third Intern. Scientific Conf. Polar Mechanics. Vladivostok, Russia, September 27–30, 2016. Scientific ed. A. Becker; School of Engineering FEFU. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 2016, p. 618–628. URL: <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/5bc/PolarMechanics.pdf> – 09.10.2019.
10. Damage and ways to improve ship structures. N.V. Barabanov, N.A. Ivanov, V.V. Novikov, G.P. Shemendjuk. L., Shipbuilding, 1989, 256 p.
11. Fayvisovich A.V., Chura M.N. An approximate method for assessing the duration of the initial stage of fatigue failure of ship propeller shafts. Transport Business in Russia. 2011(10):79–80.
12. Fedotov S.N. Quasi-fragile destruction as the destruction of a hierarchical structure. Physical Mesomechanics. 2015(18):24–31.
13. Khazhinsky G.M. Deformation. Destruction. Reliability: problems of deformation and destruction of steel. Methods for assessing the strength of power equipment and pipelines. Moscow, Lenand, 2014, 544 p.
14. Khazhinsky G.M. The mechanics of small cracks in calculating the strength of equipment and pipelines. Moscow, Fizmatkniga, 2008, 256 p.
15. Yamaleev K.M., Gumerova L.R. Structural aspects of the destruction of metal pipelines. Ufa, Guilem, 2011, 144 p.
16. Kazanov G.T., Novikov V.V., Antonenko S.V., Melnik V.V., Shemendjuk G.P. Full and residual resources of steel ship's hull in view of its damages from cyclically variable and long-lived actions of wave loadings. The 21st Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM 2007. Yokohama, Japan, 10–13 Sept., 2007, p. 105–109.