

7. Matveev Yu. I. Pobishenie dolgovечnosti detaley sudovix dizeley s ispolzovaniyem plazmennoqo napileniya b lazernoy obrabotki// Avtoreferat dissertaziyi na soiskanie uchenoy stepeni doktora texnicheskix nauk. Sankt-Peterburqskiy qosudarstvenniy universitet vodnix kommunikaziy. Sankt-Peterburq, 2003. - 40 s.
8. Paxomova N.V. Ozenka resursa sopryajeniya "zilindrovaya vtulka-porshnevoe kolzo" sudovix malorazmernix dizeley // Izvestiya Samarskoqo nauchnoqo zentra Rossiyskoy Akademiyi nauk, tom 15, No6(2), 2013, s. 448 – 452.
9. Mishkin M.K., Petrokovez M.I. Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovi I texnicheskie prilozheniya triboloqii. M.: Fizmatlit, 2007. - 368 s.
10. Sheyder Yu.Q. Texnologiya finishnoy obrabotki davleniem: Spravochnik. S-Pb.: Politexnika, 1998. - 414 s.
11. Gusev A.I., Rempel A.A. Nanocrystalline Materials. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2004. - 351 p.
12. Sidorov L.N. I dr. Fullereni. M.: Ekzamen, 2005. - 687 s.

УДК 629.5.035.8

DOI: 10.34046/aumsuomt96/17

К ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА СУДОВЫХ ГРЕБНЫХ ВАЛОВ

М.Н. Чура, кандидат технических наук, доцент

А. В. Файвисович, доктор технических наук, профессор

В статье рассмотрены стадии процесса усталостного разрушения судовых конструктивных элементов (КЭ) на примере гребного вала судна, изготовленного из стали 35. Выделены три стадии процесса усталостного разрушения: 1) инкубационная – от момента зарождения микротрещин до возникновения малых трещин; 2) развитие малых трещин вплоть до появления макротрещины; 3) рост макротрещины до момента полного разрушения КЭ. Описана вторая стадия усталостного разрушения – стадия роста малой усталостной трещины. На основании полученных ранее выводов по кинетике малой трещины и применении классических подходов по определению продолжительности стадии роста макротрещины, с использованием коэффициента интенсивности напряжений, авторами предложена математическая модель, позволяющая численно оценить продолжительность стадии роста малой трещины. Практическое значение осуществления данной стадии определяется ее относительной продолжительностью, что составляет большую часть от общей долговечности КЭ, а для некоторых материалов и условий нагружения эта величина может достигать до 80 – 95 % от всей долговечности КЭ. Рассмотрена сходимость результатов расчета по предложенной модели с полученными на образцах экспериментальными данными и расчетом по модели Хобсона-Брауна.

Ключевые слова: малая трещина, усталостное разрушение, стадии разрушения, судовой валопровод
 The article considers the stages of the process of fatigue failure of ship structural elements (SE) on the example of a ship's propeller shaft made of steel 35. Three stages of the fatigue failure process are distinguished: 1) incubation – from the moment of microcracks origin to the appearance of small cracks; 2) the development of small cracks up to the appearance of a macro-crack; 3) the growth of a macro-crack until the complete destruction of the SE. The second stage of fatigue failure is described – the stage of growth of a small fatigue crack. Based on the previously obtained conclusions on the small crack kinetics and the application of classical approaches to determining the duration of the macro-crack growth stage, using the stress intensity coefficient, the authors propose a mathematical model that allows us to numerically estimate the duration of the small crack growth stage. The practical significance of this stage is determined by its relative duration, which is most of the total durability of the.

Keywords: small crack, fatigue failure, stages of failure, ships propeller shaft.

Важным фактором обеспечения безопасности мореплавания, а также эффективности эксплуатации судна является сохранение и поддержание на требуемом уровне технического состояния основных его элементов. Многие детали и КЭ судовых систем и механизмов, как и судно в целом, в процессе эксплуатации испытывают переменные нагрузки, связанные с волновым воздействием и цикличностью работы агрегатов, что может привести к возникновению и развитию процесса усталостного разрушения. Одним из таких элементов является судовой валопровод, который состоит из ряда промежуточных и концевых

(гребного) вала. Прогнозирование процесса усталостного разрушения судового гребного вала играет весьма существенное значение для определения наработки вала до его плановой замены, т.к. экономические затраты судовладельца при плановой замене гребного вала примерно в пять раз меньше, чем ущерб от его поломки [1]. Кроме того, необходимо отметить, что аварии propulsion комплекса судна, связанные с отказами валопроводов, зачастую являются следствием разрушения гребного вала и приводят к потере судном хода и управляемости. Таким образом, оценка долговечности судового гребного вала с

учетом его трещиностойкости играет существенную роль в обеспечении безопасности эксплуатации судна.

Процесс разрушения поликристаллических конструкционных материалов под действием переменных во времени нагрузок имеет весьма сложную физическую природу и зависит от ряда сопутствующих ему факторов, таких как характер нагружения, наличие активной окружающей среды, механические свойства самого материала, наличие или отсутствие концентраторов напряжений и т.д. Процесс усталостного разрушения можно разделить на три стадии [2]: инкубационная – охватывает процесс зарождения и развития микротрещин вплоть до возникновения малых трещин; зарождения макротрещин – соответствует развитию малых трещин вплоть до появления макротрещин; докритического роста макротрещин – соответствует развитию макротрещин вплоть до выхода из строя КЭ.

Таким образом полная долговечность КЭ может быть представлена как совокупность отдельных процессов – сумма циклов нагружения, затрачиваемых на три характерных стадии общего процесса разрушения:

$$N_p = N_I + N_{II} + N_{III},$$

где N_I – стадия зарождения микротрещины размером, не превышающим средний диаметр зерна структуры конструкционного материала; N_{II} – стадия роста малой трещины; N_{III} – стадия роста макротрещины.

Вторая стадия характеризуется ростом трещины в пределах нескольких зерен. Для нее характерно скачкообразное развитие трещин, что связано с влиянием силовых барьеров, которыми являются границы зерен [3 – 6]. Размеры трещин на второй стадии достигают порядка 0,5 – 1 мм [7], что соответствует возможности обнаружения при помощи цветной или магнитной дефектоскопии. Как показывает практика [8, 9], именно на вторую стадию усталостного разрушения приходится порядка 40 – 60 % общей долговечности, а для некоторых материалов и условий нагружения эта цифра может доходить до 80 – 90 % от всей долговечности конструктивного элемента [10].

Используя полученные ранее выводы по кинетике малой трещины [11], и зная количественное определение правой границы данной стадии на оси наработки, численное прогнозирование стадии N_{II} можно свести к определению средней скорости роста малой трещины

$$V_{cp} = \frac{10d_{cp}}{N_{II}},$$

где $N_{II} = N - N_I - N_{III}$.

Первое и второе слагаемые в правой части определены по результатам эксперимента и представляют собой зависимости от наибольших значений напряжений цикла нагружения

$$N = a\sigma_{max}^b,$$

и

$$N_I = a_I\sigma_{max}^{b_I}.$$

Продолжительность третьей стадии роста макротрещины определяется численно по следующей формуле

$$N_{III} = \int_{10d_{cp}}^{l_{кр}} \frac{dl}{f(\Delta K_I)},$$

где $f(\Delta K_I)$ – функция от размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_I , определяется исходя из условий нагружения и геометрии образца; $l_{кр}$, – критический размер трещины, предшествующий моменту полного разрушения образца.

$$l_{кр} = \lambda a,$$

где λ – относительная длина трещины по поверхности образца, определяется из уравнения:

$$Y = 6\lambda^{1/2}(1,87 - 3,27\lambda + 8,29\lambda^2),$$

при выполнении условия $0,16 \leq \lambda \leq 0,5$,

где Y – безразмерный коэффициент, зависящий от относительного размера трещины, определяемый по формуле [12]:

$$Y = \frac{K_{Ifc}}{\sigma_{max} d^{1/2}},$$

где K_{Ifc} – критический коэффициент интенсивности напряжений (для материала сталь 35 $K_{Ifc} = 26,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ [13]).

С учетом выражений, приведенных выше, средняя скорость малой трещины может быть определена по формуле:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{10d_{cp}}{a\sigma_{max}^b - a_I\sigma_{max}^{b_I} - \int_{10d_{cp}}^{l_{кр}} \frac{dl}{f(\Delta K_I)}}.$$

Полученное выражение средней скорости роста малой трещины может быть несколько упрощено, если пренебречь длительностью первой стадии разрушения. Это действие не внесет существенную ошибку в определение средней скорости роста малой трещины, т.к. протяженность стадии зарождения микротрещины (N_I) существенно меньше стадии роста малой трещины (N_{II}). При этом не потребуется экспериментально находить коэффициенты a_I и b_I , что существенно упростит использование предлагаемой модели и методики расчета реального вала.

Выражение средней скорости малой трещины, V_{cp} , с учетом указанных изменений, примет следующий вид:

$$V_{cp} = \frac{10d_{cp}}{a\sigma_{max}^b - \int_{10d_{cp}}^{l_{кр}} \frac{dl}{f(\Delta K_1)}}$$

Рассмотрим сходимость результатов расчета по предложенной модели с полученными на образцах экспериментальными данными.

Для этого были использованы результаты эксперимента, проведенного на установке для испытания образцов на усталость при чистом изгибе

с асимметрией цикла напряжений $R = -1$. Результаты расчета по изложенной выше методике оценки продолжительности стадии роста малых трещин сравнивались с данными эксперимента и расчетом по модели Хобсона-Брауна [14]. В качестве параметра сравнения использовалась нагрузка, выраженная в циклах нагружения, до момента перехода малой трещины в макротрещину. Для определения расхождения результатов расчета было рассчитано относительное отклонение между расчетными и экспериментальными данными по пяти уровням напряжений диаграммы усталостного разрушения стали 35 (рис. 1).

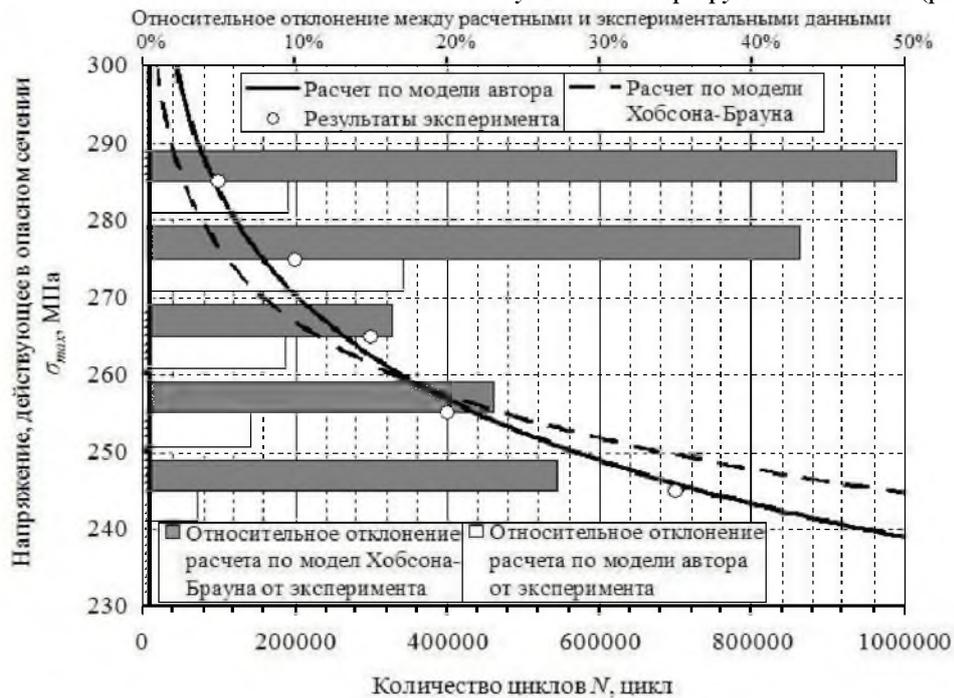


Рисунок 1 – Сравнительный анализ расчета по предложенной модели с экспериментальными данными и результатами расчета по модели Хобсона-Брауна

Данные расчета по предлагаемой в данной работе модели и модели Хобсона-Брауна приведены в таблице 1. Сравнение полученных расчетных данных с результатами эксперимента показали, что предлагаемая в данной работе модель показывает удовлетворительные результаты прогнозирования продолжительности стадии роста

малой трещины (относительная погрешность не превышает 10% по сравнению с данными эксперимента). В то же время результаты прогнозирования продолжительности стадии роста трещины по модели Хобсона-Брауна составляют относительную погрешность более 20%.

Таблица 1 - Результаты расчета по предлагаемой модели автора и Хобсона-Брауна

Действующее напряжение σ , МПа	Число циклов нагружения (расчет/эксперимент) N , цикл			
	Предлагаемая модель	Относительное отклонение	Модель Хобсона - Брауна	Относительное отклонение
245	726 360	9,42%	893 406	27,63%
	700 000		700 000	
255	428 673	16,97%	492 457	23,11%
	400 000		400 000	
265	272 308	9,23%	250 678	16,44%
	300 000		300 000	
275	166 070	7,17%	113 336	43,33%
	200 000		200 000	
285	90 578	3,77%	50 536	49,46%
	100 000		100 000	

Итогом расчетов по предложенной модели является прогностическая оценка продолжительности начальной стадии усталостного разрушения, т.е. эксплуатационного ресурса судового гребного вала, выраженная в количестве циклов нагружения. При этом параметры цикла будут зависеть от нагрузок, заложенных в расчетную модель в качестве исходных данных.

Если полученные результаты выражены в циклах максимальной нагрузки, то для определения продолжительности начальной стадии усталостного разрушения, выраженной в часах наработки, необходимо использование определенной методики перевода. Данная методика основывается на анализе статистических данных режимов работы гребного вала конкретного судна. Разработка такой методики требует индивидуального подхода к объекту исследования, проведения большой серии натурных испытаний и может являться самостоятельной задачей для проведения исследований. В рамках данной работы подобная методика не рассматривалась.

В результате проделанной работы авторами предложена математическая модель прогнозирования начальной стадии усталостного разрушения судового гребного вала, позволяющая:

- определить продолжительность начальной стадии усталостного разрушения гребного вала (до возникновения макротрещины) в зависимости от условий его эксплуатации;
- оценить остаточный рабочий ресурс гребного вала;
- установить допустимые безопасные характерные размеры дефектов в зависимости от их местоположения, геометрии и режима нагружения гребного вала;
- получить количественную информацию о локальной прочности гребного вала при решении эксплуатационных и ремонтных задач.

Данная модель может быть положена в основу расчетной методики, которая, с учетом конкретизации параметров, позволит оценить наработку гребного вала судна в целях обеспечения безопасности мореплавания.

Литература

1. Тинь Д. Разработка и обоснование методики прогнозирования долговечности судовых валов с трещинами при ремонте: диссертация канд. техн. наук. – Астрахань, 2009. – 128 с.
2. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургиздат, 1963. – 272 с.
3. P. Hansson, S. Melin, C. Persson, Computationally efficient modelling of short fatigue crack growth using

- dislocation formulations, *Engineering Fracture Mechanics* xxx (2008) xxx–xxx.
4. R. Lillbacka, E. Johnson, M. Ekh, A model for short crack propagation in polycrystalline materials, *Engineering Fracture Mechanics* 73 (2006) 223–232.
5. Krajcinovich D., Rinaldi A. Statistical damage mechanics // *Theoretical and applied fracture mechanics* – 2005. - №72. – P. 76-81.
6. Bai Y.L., Xia M.F., Ke F.J., Li H.L. Statistical micro damage mechanichanics and damage field evolution // *Theoretical and applied fracture mechanics*. – 2001. - №37. – P. 1-10
7. B. Kuñkler, O. Duüber, P. Koöster, U. Krupp, C.-P. Fritzen, H.-J. Christ, Modelling of short crack propagation – Transition from stage I to stage II, *Engineering Fracture Mechanics* 75 (2008) 715–725.
8. Селиванов В.В. Механика деформируемого тела: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 424 с., ил.
9. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 с., ил.
10. Прокопенко А.В., Черныш О.Н. Развитие коротких поверхностных усталостных трещин в стали 20Х13 и сплаве ВТ9 // *Проблемы прочности*. – 1989. – № 5. с. 12 – 16.
11. Чура М.Н. К оценке усталостной прочности материалов материалов судовых валопроводов // *Эксплуатация морского транспорта* – 2019. – № 4 (93).– с. 115-122.
12. Файвисович А.В. Прогнозирование усталостного разрушения конструкционных элементов: диссертация доктора техн. наук. – Новороссийск, 1996. – 346 с.
13. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие. В 4 т. Т. 3/ под общей ред В.В. Панасюка: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / Ковчик С.Е., Морозов Е.М. – Киев: Наук. Думка, 1988. – 436 с.
14. Hobson P., Brown M. In the behavior of short fatigue cracks // *Eds. Miller K.J and De Los Rios E.R.* – 1986. – p. 441 – 449.

References

1. Tin' D. Razrabotka i obosnovanie metodiki prognozirovaniya dolgovechnosti sudovyh valov s treshchinami pri remonte. Dissertaciya kand. tekhn. nauk. – Astrahan', 2009. – 128 s.
2. Ivanova V.S. Ustalostnoe razrushenie metallov. – M.: Metallurgizdat, 1963. – 272 s.
3. P. Hansson, S. Melin, C. Persson, Computationally efficient modelling of short fatigue crack growth using dislocation formulations, *Engineering Fracture Mechanics* xxx (2008) xxx–xxx.
4. R. Lillbacka, E. Johnson, M. Ekh, A model for short crack propagation in polycrystalline materials, *Engineering Fracture Mechanics* 73 (2006) 223–232.

5. Krajcinovich D., Rinaldi A. Statistical damage mechanics // Theoretical and applied fracture mechanics – 2005. - №72. – P. 76-81.
6. Bai Y.L., Xia M.F., Ke F.J., Li H.L. Statistical micro damage mechanichanics and damage field evolution // Teoretical and applied fracture mechanics. – 2001. - №37. – P. 1-10
7. B. Kutinkler, O. Duüber, P. Koöster, U. Krupp, C.-P. Fritzen, H.-J. Christ, Modelling of short crack propagation – Transition from stage I to stage II, Engineering Fracture Mechanics 75 (2008) 715–725.
8. Selivanov V.V. Mekhanika deformiruемого tela: Uchebnik dlya vtuzov. – 2-e izd., ispr. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2006. – 424 s., il.
9. Pestrikov V.M., Morozov E.M. Mekhanika razrusheniya tverdyh tel: kurs lekcij. – SPb.: Professiya, 2002. – 320 s., il.
10. Prokopenko A.V., Chernysh O.N. Razvitie korotkih poverhnostnyh ustalostnyh treshchin v stali 20H13 i splave VT9 // Problemy prochnosti. – 1989. – № 5. s. 12 – 16.
11. CHura M.N. K ocenke ustalostnoj prochnosti materialov materialov sudovyh valoprovodov // Ekspluatatsiya morskogo transporta – 2019. – № 4 (93). s. 115 – 122.
12. Fajvisovich A.V. Prognozirovaniye ustalostnogo razrusheniya konstrukcionnyh elementov. Dissertatsiya doktora tekhn. nauk. – Novorossiysk, 1996. – 346 s.
13. Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov: Sprav. Posobie: V 4 t. / Pod obshchej red. Panasyuka V.V. T. 3: Harakteristiki kratkovremennoj treshchinostojkosti materialov i metody ih opredeleniya / Kovchik S.E., Morozov E.M. – Kiev: Nauk. Dumka, 1988. – 436 s.
14. Hobson P., Brown M. In the behavior of short fatigue cracks // Eds. Miller K.J and De Los Rios E.R. – 1986. – p. 441 – 449.

УДК 629

DOI: 10.34046/aumsuomt96/18

КОНЦЕПЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А.И. Епихин, кандидат технических наук, доцент

М.А. Модина, кандидат технических наук, доцент

Е.В. Хекерт, д.т.н., профессор кафедры СВ

Статья посвящена разработке концепции экологического совершенствования судовых энергетических установок. В процессе исследования концепция представлена в виде неделимого триумвирата теоретического, методологического и практического аспектов. Теоретический аспект ориентирован на международные требования. Методологические основы представлены комплексом элементов, нацеленных на повышение экологичности технических и технологических составляющих СЭУ. С точки зрения практики рассмотрены особенности очистки выхлопных газов за счет унификации интенсификации процессов фильтрации и охлаждения газового потока путем межфазного контактного взаимодействия в барботирующем слое воды, а также выделены перспективы использования кайта в качестве дополнительного экологически чистого двигателя.

Ключевые слова: судно, экология, энергетическая установка, очистка.

Admiral F. F. Ushakov state Maritime University Admiral F. F. Ushakov state Maritime University The article is devoted to the development of the concept of ecological improvement of ship power plants. In the process of research, the concept is presented as an indivisible triumvirate of theoretical, methodological and practical aspects. The theoretical aspect is focused on international requirements. The methodological foundations are represented by a set of elements focused on improving the environmental friendliness of technical and technological components of the EMS. From the point of view of practice, the features of cleaning exhaust gases due to the unification and intensification of the processes of filtration and cooling of the gas flow by means of interphase contact interaction in a bubbling layer of water are considered, as well as the prospects for using the kite as an additional environmentally friendly engine.

Key words: ship, ecology, power plant, cleaning.

Влияние вредных выбросов судовых энергетических установок (СЭУ) на глобальное экологическое состояние водного и воздушного бассейна является достаточно существенным и оценивается в 15-17% от общей величины выбросов вредных веществ сухопутными транспортными средствами и стационарными энергетическими установками [1]. Кроме того, по причине высокой агрегатной мощности СЭУ могут выступать в качестве основного источника загрязнения атмосферы в таких локальных зонах как акватории

рек, порты, территории городов. Решение проблемы экологичности СЭУ регламентируется требованиями Международной Морской Организации (ИМО).

Основным источником загрязнения окружающей среды являются главные и вспомогательные двигатели. В качестве главных судовых двигателей на сегодняшний день чаще всего используются дизельные. Соответственно в настоящее время морская транспортная индустрия сталкивается с повышенными требованиями к сокращению вредных выбросов дизельными агрегатами СЭУ.