control system for the longitudinal profile of nonrigid shafts during turning]. Saratow. 2013. Pp.189.

- Tarng Y S, Wang Y S A new adaptive controller for constant turning force (1994) Int.J.Adv.Manuf. Technol. 9.211-216.
- Budnichenko M. A., Kuz'min V. V. Opyt ispol'zovanija jelektronnyh tehno-logij na sudostroitel'nom predprijatii (2019) [Experience in the use of electronic technologies in a shipbuilding enterprise]. 1.43-45.
- 25. Kljahin V. N., Chulkin S. G., Mineev A. S., Fomichev A. B. Ispol'zovanie me-todologii sistemnogo analiza pri proektirovanii korabel'nyh sistem podderzhki prinjatija reshenij (2019) [The use of system analysis methodology in the design of ship decision support systems]. 1. 52-58.
- Kondrat'ev S.I., Bojchuk I.P. Matematicheskaja modeldvizhenija morskoj burovoj platformy (2016) [Mathematical model of motion of marine drilling platform].11-15.

УДК 629.5.035.8 DOI: 10.34046/aumsuomt93/18

К ОЦЕНКЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ СУДОВЫХ ВАЛОПРОВОДОВ

М.Н. Чура кандидат технических наук, доцент

В статье рассмотрены существующие стадии процесса усталостного разрушения судовых конструктивных элементов на примере конструкционного материала гребного вала судна. Кратко охарактеризована методика проведенного эксперимента по исследованию процесса зарождения и дальнейшего роста усталостных трещин в образцах, выполненных из углеродистой стали 35. Проведен анализ результатов усталостных испытаний, по результатам которого отмечено, что трещинообразные дефекты появляются на поверхности испытуемых образцов уже после непродолжительного нагружения. Ориентация зародившихся трещин относительно оси приложения нагружения носит хаотичный характер, а зарождение трещин преимущественно происходит в телах зерен микроструктуры материала. Испытания материала при напряжениях превышающих предел выносливости показали, что микротрещина развивается в пределах границ зерна, а затем приостанавливает свой рост. Отмечено, что границы зерен, фаз или включений играют роль силовых барьеров, для преодоления которых микротрещине необходимо накопить необходимую энергию деформации. Основной результат работы заключается в определении границы перехода малой трещины в стадию развития макротрещины. Автором предложено считать, что такая граница соответствует длине трещины равной размерам десяти средних диаметров зерна микроструктуры.

Ключевые слова: судовой валопровод, гребной вал судна, усталостное разрушение, малая трещина

The article considers the existing stages of the process of fatigue destruction of ship structural elements on the example of the structural material of the propeller shaft of the vessel. The technique of the experiment to study the process of origin and further growth of fatigue cracks in samples made of carbon steel 35 is briefly characterized. The analysis of the results of fatigue tests was carried out, according to the results of which it was noted that crack-like defects appear on the surface of the test samples after a short loading. The orientation of the nucleated cracks relative to the axis of loading application is chaotic, and the origin of cracks mainly occurs in the grain bodies of the microstructure of the material. Tests of the material at stresses exceeding the endurance limit showed that the microcrack develops within the grain boundaries, and then stops its growth. It is noted that the boundaries of grains, phases or inclusions play the role of force barriers, to overcome which the microcrack must accumulate the necessary deformation energy. The main result of the work is to determine the boundary of the transition of a small crack in the stage of development of a macro-crack. The author proposes to assume that such a boundary corresponds to the crack length equal to the size of ten average grain diameters of the microstructure.

Keywords: ship's shaft line, ships propeller shaft, fatigue failure, small crack.

Большинство судовых конструктивных элементов в режиме эксплуатации испытывают механические нагрузки, переменные во времени, что является условием возникновения и развития дефектов усталостного характера. Одним из таких элементов является валопровод судна, входящий в судовой пропульсивный комплекс. Валопровод судна подвержен нагрузкам динамического характера [1, 2]. Ранее отмечалось [3], что порядка 18% аварий, связанных с пропульсивным комплексом судна, приходится на отказ валопровода. Это составляет около 9% от общего количества аварий судна. Экономический ущерб от таких аварий связан с простоем судна вследствие необходимости экстренного вывода его из эксплуатации и расходами на: спускоподъемные операции, монтажно-демонтажные работы, дефектацию гребного вала, покупку или изготовление нового гребного вала, арендную плату за использование причальных стен и стапельных мест. Данные расходы более чем в четыре раза превышают затраты, возникающие при плановой замене гребного вала [4].

Весь процесс усталостного разрушения поликристаллических конструктивных материалов можно разделить на три стадии [5]: инкубационная – охватывает процесс зарождения и развития микротрещин вплоть до возникновения малых трещин; зарождения макротрещин – соответствует развитию малых трещин вплоть до появления макротрещин; докритический рост макротрещин – соответствует развитию макротрещин вплоть до разрушения конструктивного элемента. Таким образом полная долговечность конструктивного элемента может определяется как сумма циклов нагружения, затрачиваемых на три характерных стадии процесса разрушения:

 $N_{\mathbf{P}} = N_{\mathbf{I}} + N_{\mathbf{II}} + N_{\mathbf{III}},$

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.

Первую стадию усталостного разрушения можно физически разделить на два этапа. Первый этап характеризуется образованием полос скольжения [6, 7]. Данный этап не может быть рассмотрен как непосредственно сам процесс разрушения, так как образование полос скольжения является обратимым процессом. Второй этап связан с появлением несплошностей в микроструктуре материала, которые возникают в полосах скольжения у границ зерен и включений. Различные дефекты микроструктуры, такие как дислокации, вакансии растут и сливаются между собой, превращаясь в микротрещины.

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 [8 – 11]. Размеры трещин на второй стадии достигают порядка 0,5 - 1 мм [12], что соответствует возможности обнаружения при помощи цветной или магнитной дефектоскопии. Как показывает практика [13, 14], 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 [15,16]. Третья стадия связана с развитием макротрещины, когда можно говорить о росте трещины в сплошной среде, то есть ее рост контролируется не локальными механическими свойствами и структурой материала, а напряженно-деформированным состоянием перед кончиком трещины.

Таким образом, можно отметить, что для ряда ответственных деталей и конструктивных элементов, таких как гребные валы морских судов, эксплуатация которых с наличием трещин запрещается согласно требованиям ФАУ «Российский морской регистр судоходства» (РМРС) [16], наиболее актуальным является вопрос определения продолжительности протекания первой и второй стадий, а не вопрос прогнозирования общей долговечности элемента. Поэтому для вопроса обеспечения безопасности работы пропульсивного комплекса морских судов особенно важно изучение процесса зарождения и роста именно малых трещин.

Для изучения процесса зарождения и роста малых усталостных трещин был выбран конструкционный материал - сталь 35, что согласуется с требованиями классификационных обществ и ряда нормативных документов, в части применения для изготовления гребных, промежуточных и упорных валов малоуглеродистых или низколегированных сталей, имеющих определенные механические свойства. Применение высоколегированных и высокоуглеродистых сталей в качестве конструкционного материала судовых гребных валов ограничено в силу низких значений предела прочности и высокой чувствительности к конструктивным концентраторам напряжения указанных материалов. Механическим свойствам материла гребных валов диаметром до 250 мм, согласно правилам РМРС [16], в соответствии с ГОСТ 8536-79 «Заготовки судовых валов и баллеров рулей из коррозионностойких сталей» отвечают марки сталей: сталь 20, 25, 30, 35, 40 и др.

Исследование процесса зарождения и дальнейшего роста (кинетики) трещин проводилось путем испытания образцов на испытательной установке МУИ-6000, путем создания повторнопеременных нагрузок при чистом изгибе вращающегося образца с коэффициентом асимметрии нагружения R = -1.

Методика эксперимента заключалась в том, что по мере наработки 5·10³ циклов испытательная машина останавливалась и проводился анализ повреждений поверхностного слоя образца с помощью металлографического микроскопа с цифровой фотокамерой при рабочем увеличении 300х. Данная методика позволяла фиксировать трещины длиной 5 – 7 мкм. При этом на предварительно подготовленной поверхности образца фиксировались все микродефекты, появившиеся за указанный промежуток времени испытаний образца.

Исследование процесса зарождения усталостных трещин позволило сделать вывод о том, что уже после непродолжительного времени нагружения (1-3% от общей долговечности) на поверхности образца появлялись трещинообразные дефекты длиной 10-30 мкм. При дальнейшем нагружении количество зародившихся трещин увеличивалось, и наблюдался прирост ранее появившихся трещин. На начальной стадии испытаний образцов ориентация зародившихся микротрещин относительно оси приложения нагрузки хаотична, что свидетельствует о существенном влиянии произвольной ориентации по объему образца зерен микроструктуры материала на этой стадии развития повреждений, границы которых являются локальными силовыми барьерами для микротрещин, а также о существенной неоднородности локального напряженно-деформированного состояния конструкционного поликристаллического материала. Отмечено так же, что для стали 35, как и для большинства углеродистых сталей, характерно зарождение трещин в телах зерен, нежели на их границах.

Испытание образца при напряжениях превышающих предел выносливости показало, что микротрещина развивается в пределах границ зерна, а затем приостанавливает свой рост, т.к. границы зерен, фаз или включений играют роль силовых барьеров, у трещин не хватает энергетического потенциала для преодоления этих барьеров. По мере дальнейшего нагружения происходит накопление трещиной энергии деформаций, что в конечном итоге приводит к прохождению трещиной силового барьера. Аналогичная ситуация происходит при достижении следующей границы зерна, однако в этом случае трещина имеет сравнительно больший размер, соответственно представляет собой более сильный концентратор напряжений, поэтому процесс преодоления силового барьера происходит быстрее.

Пример кинетики малой трещины с момента ее возникновения и до образования магистральной макротрещины приведен на рис. 1. Испытание осуществлялось при максимальном напряжении цикла нагружения $\sigma_{max} = 260$ МПа. Зарождение трещины зафиксировано было на базе $N = 110\ 000$ циклов нагружения, длина зародившейся трещины составила 19 мкм. Разрушение образца произошло при N = 508 600 циклов. Длина трещины перед разрушением образца составила 7713 мкм. По данным графика изменения средней скорости роста малой трещины следует отметить, что ее кинетика в пределах размера примерно 200 мкм, что на порядок больше характерного размера зерна стали 35, представляет собой весьма неравномерный характер. Это подтверждает специфику развития малой трещины, на которую существенное влияние оказывает наличие силовых барьеров, таких как границ зерен. Дальнейший рост трещины характеризуется устойчивым увеличением ее скорости, что характерно для развития макротрещин. Можно сделать вывод о том, что малая трещина переходит в статус макротрещины именно в тот момент, когда барьеры микроструктуры перестают оказывать заметное влияние на скорость ее роста.

Для определения границы стадии роста малой трещины, соответствующей переходу к макротрещине, проведем анализ и установим характерные особенности кинетики трещины на данной стадии разрушения. На рис. 2-4 приведены результаты испытаний образцов на воздухе с различными максимальными напряжениями цикла нагружения.

Характерные особенности кинетики малой трещины хорошо видны при рассмотрении отдельных трещин. На рис. 5 – 7 приведены наиболее характерные экспериментальные данные по кинетике поверхностных трещин в гладких образцах. Кроме точек, соответствующих экспериментальным данным, на рисунках показаны пунктиром полосы разброса этих данных.

Анализ приведенных данных позволяет сделать следующий основной вывод: трещины размером меньше 10d_{ср} имеют значительно больший разброс значений параметра скорости роста, нежели трещины с размером, превышающим величину 10d_{ср}. Это объясняется существенным влиянием на рост малой трещины различных силовых барьеров, в первую очередь, границ зерен. Очевидно, что на данном этапе разрушения малая трещина не проявляет себя как мощный концентратор напряжений, в отличие от макротрещины. на рост которой границы зерен не оказывают заметного влияния. Данный вывод справедлив для всех уровней напряжений, приведенных на рис. 3.4 – 3.6, на которых показано, что полоса разброса для значений скорости роста трещины размером меньше 10d_{cp} (малая трещина) существенно больше полосы разброса для трещины размером больше 10d_{cp} (макротрещина). То есть размер трещины 10d_{ср} можно принять за правую границу второй стадии разрушения (N_{II}), соответствующей развитию малой трещины.



Рисунок 1 – Развитие трещины в образце при σ = 260 МПа



Рисунок 4 – Кинетика трешины при
 σ_{max} = 280 МПа











Рисунок 6 – Изменение скорости роста трещин при отах = 260МПа



Рисунок 7 – Изменение скорости роста трещин при отах = 280МПа

Так же можно отметить тот факт, что скорость роста малой трещины во всем своем диапазоне длины практически не изменяется (не зависит от длины трещины) и зависит только от величины напряжения (малая трещина не проявляет себя в качестве концентратора напряжений), тогда как скорость макротрещины существенно зависит и от ее длины: с увеличением размера трещины ее скорость заметно возрастает.

Используя полученные выводы по кинетике малой трещины, и зная количественное определение границы данной стадии, численное прогнозирование стадии N_{II} можно свести к определению средней скорости роста малой трещины на основе формулы:

$V_{cp} = 10 d_{cp} / N_{II}$

Указанная формула может быть использована при разработке математической модели методики прогнозирования продолжительности начальной стадии усталостного разрушения судовых гребных валов.

Литература

- Кушнер Г.А., Мамонтов В.А. Влияние неоднородности распределения коэффициента жесткости дейдвудных подпилников на собственную частоту поперечных колебаний валопровода судна // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 1. с. 89 96.
- Кукарина А.Ю., Миронов А.И., Рубан А.Р. Влияние износов дейдвудных подпипников и гидродинамического момента на устойчивость вращения гребного вала // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 1(35). с. 145-153.
- Емельянов М.Д. Система компьютерного мониторинга технического состояния морских судов с оценкой рисков // Научно-технический сборник РМРС – 2008. – № 31. с. 23 – 43.
- Тинь Д. Разработка и обоснование методики прогнозирования долговечности судовых валов с трещинами при ремонте: диссертация канд. техн. наук. – Астрахань, 2009. – 128 с.
- Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. М.: Металлургиздат, 1963. – 272 с.
- N. Narasaiah, K.K. Ray, Initiation and growth of micro-cracks under cyclic loading, Mater. Sci. Eng. A 474 (2008) 48–59.
- Reddy S.C., Fathemi A. Small crack growth in multiaxial fatigue // ASTM SNP. Advanches in fatigue lifetime predictive technigues. – 1992. - №1122. – P. 276-298.
- P. Hansson, S. Melin, C. Persson, Computationally efficient modelling of short fatigue crack growth using dislocation formulations, Engineering Fracture Mechanics xxx (2008) xxx–xxx.
- R. Lillbacka, E. Johnson, M. Ekh, A model for short crack propagation in polycrystalline materials, Engineering Fracture Mechanics 73 (2006) 223–232.

- Krajcinovich D., Rinaldi A. Statistical damage mechanics // Theoretical and applied fracture mechanics – 2005. - №72. – P. 76-81.
- 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
- B. Kuünkler, 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.
- Селиванов В.В. Механика деформируемого тела: учебник для втузов. – 2-е изд., испр. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 424 с., ил.
- Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 с., ил.
- Прокопенко А.В., Черныш О.Н. Развитие коротких поверхностных усталостных трещин в стали 20Х13 и сплаве ВТ9 // Проблемы прочности. – 1989. – № 5.– С. 12 – 16.
- Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки судов Т. 2 СПб.: 2005. – 638 с.
- 17.Кондратьев С.И., Файвисович А.В. Прогнозирование влияния волновой нагрузки на рост трещин в конструктивных элементах судна// Морские интеллектуальные технологии.– 2018.– № 1-1 (39).– С. 140-147.

References

- Kushner G.A., Mamontov V.A. Vliyanie neodnorodnosti raspredeleniya koefficienta zhestkosti dejdvudnyh podshipnikov na sobstvennuyu chastotu poperechnyh kolebanij valoprovoda sudna // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2019. – № 1. s. 89 – 96.
- Kukarina A.YU., Mironov A.I., Ruban A.R. Vliyanie iznosov dejdvudnyh podshipnikov i gidrodinamicheskogo momenta na ustojchivosť vrashcheniya grebnogo vala // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. – 2016. – № 1(35). s. 145-153.
- Emel'yanov M.D. Sistema komp'yuternogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya morskih sudov s ocenkoj riskov // Nauchno-tekhnicheskij sbornik RMRS – 2008. – № 31. s. 23 – 43.
- Tin' D. Razrabotka i obosnovanie metodiki prognozirovaniya dolgovechnosti sudovyh valov s treshchinami pri remonte. Dissertaciya kand. tekhn. nauk. – Astrahan', 2009. – 128 s.
- Ivanova V.S. Ustalostnoe razrushenie metallov. M.: Metallurgizdat, 1963. – 272 s.
- N. Narasaiah, K.K. Ray, Initiation and growth of micro-cracks under cyclic loading, Mater. Sci. Eng. A 474 (2008) 48–59.

- Reddy S.C., Fathemi A. Small crack growth in multiaxial fatigue // ASTM SNP. Advanches in fatigue lifetime predictive technigues. – 1992. - №1122. – P. 276-298.
- P. Hansson, S. Melin, C. Persson, Computationally efficient modelling of short fatigue crack growth using dislocation formulations, Engineering Fracture Mechanics xxx (2008) xxx–xxx.
- R. Lillbacka, E. Johnson, M. Ekh, A model for short crack propagation in polycrystalline materials, Engineering Fracture Mechanics 73 (2006) 223–232.
- Krajcinovich D., Rinaldi A. Statistical damage mechanics // Theoretical and applied fracture mechanics - 2005. - №72. - P. 76-81.
- 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

- B. Kuünkler, 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.
- Selivanov V.V. Mekhanika deformiruemogo tela: Uchebnik dlya vtuzov. – 2-e izd., ispr. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2006. – 424 s., il.
- Pestrikov V.M., Morozov E.M. Mekhanika razrusheniya tverdyh tel: kurs lekcij. – SPb.: Professiya, 2002. – 320 s., il.
- Prokopenko A.V., CHernysh O.N. Razvitie korotkih poverhnostnyh ustalostnyh treshchin v stali 20H13 i splave VT9 // Problemy prochnosti. – 1989. – № 5. s. 12 – 16.
- Rossijskij morskoj registr sudohodstva. Pravila klassifikacii i postrojki sudov T. 2 – SPb.: 2005. – 638 s.
- 17.Kondrať ev S.I., Fajvisovich A.V. Prognozirovanie vliyaniya volnovoj nagruzki na rost treshchin v konstruktivnyh elementah sudna// Morskie intellektuaľnye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). S. 140-147.

УДК 62-192÷62-772 DOI: 10.34046/aumsuomt93/20

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН

В. Е. Деружинский, доктор эколномических наук, профессор.

К.А. Аблязов, кандидат технических наук, доцент,

Э. К. Аблязов, кандидат технических наук, доцент,

В статье рассмотрены основные законы распределения случайных величин, используемых в теории надежности технических объектов. Представлены репрезентативные примеры для различных законов распределения случайных величин. Приведены математические формулировки, используемые при оценке и расчете параметров надежности технических объектов на этапах приработки, нормальной эксплуатации и физического износа изделия. В работе также исследованы критерии выбора закона распределения отказов при расчете надежности элементов перегрузочных мапии в течение жизненного цикла. Ключевые слова: законы распределения случайных величин, параметры надежности технических объектов, определение закона распределения отказов.

The article discusses the basic laws of the distribution of random variables used in the theory of reliability of technical objects. Representative examples for various distribution laws of random variables are presented. The mathematical formulations used in the assessment and calculation of the reliability parameters of technical objects at the stages of running-in, normal operation and physical wear of the product are given. The paper also explores the criteria for choosing the law of failure distribution when calculating the reliability of elements of reloading machines during the life cycle.

Keywords: laws of distribution of random variables, reliability parameters of technical objects, determination of the law of distribution of failures.

Надежность машин закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении и поддерживается на требуемом уровне в процессе эксплуатации. На практике при эксплуатации машин показатели надежности не всегда ограничиваются сохранением первоначального уровня. Иногда этот уровень оказывается недостаточным вследствие изменения расчетных условий работы. Поэтому в процессе эксплуатации нередко решаются задачи повышения надежности существующих машин путем модернизации отдельных узлов, агрегатов или системы управления.

Развитие науки и техники в области создания новых конструкционных материалов, методов упрочнения и повышения износостойкости