

КИНЕТИКА ГЕОМЕТРИИ МАКРОТРЕЩИНЫ*А.В. Файвисович, доктор технических наук, профессор
И.Г. Береза, доктор технических наук, профессор*

Изменение геометрии макротрещины в процессе ее роста является следствием тех механизмов, которые протекают при воздействии переменных по амплитуде нагрузок. Известные решения рассматривают абсолютно острую трещину в линейно упругом материале, что приводит к сингулярности напряжений и, соответственно, к стремлению к бесконечности величины напряжений перед трещиной. Известные экспериментальные исследования показывают, что напряжения перед трещиной могут в несколько раз превышать величину предела текучести материала, но принимают все-таки конечные значения. В работе проведен анализ результатов известных исследований, посвященных вопросу поведения подвижной макротрещины при различных напряженно-деформированных состояниях. Показано, что кинетика геометрии растущей трещины заметно отличается от аналогичных характеристик неподвижной трещины, в первую очередь за счет образования при росте трещины на ее берегах пластически деформированного материала. В случае реализации перед трещиной плоского напряженного состояния проявляется эффект закрытия берегов трещины, заметно снижающий величину эффективного размаха коэффициента интенсивности напряжений, и, соответственно, скорость роста трещины. Предлагается рассматривать в качестве перспективного направления переход к решению трехмерной задачи перед кончиком трещины, как это делается в SY-моделях.

Ключевые слова: конструктивный элемент, макротрещина, напряженное состояние, коэффициент интенсивности напряжений, пластическая зона

The change in the geometry of a macrocrack in the process of its growth is a consequence of the mechanisms that occur under the effect of variable amplitude loads. Known solutions consider an absolutely sharp crack in a linearly elastic material, which leads to a singularity of stresses and accordingly to a tendency of infinite magnitudes of stresses in front of the crack. Well-known experimental studies show that the stresses in front of a crack can be several times higher than the yield strength of a material but still take final values. The paper analyzes the results of well-known studies on the behavior of a moving macrocrack in various stress-strain states. It is shown that the kinetics of the geometry of a growing crack differs noticeably from similar characteristics of a fixed crack, primarily due to the formation of a plastically deformed material on the crack sides. In the case of the implementation of a plane stress state in front of a crack the effect of the crack sides closing appears, significantly reducing the effective magnitude of the stress intensity factor and, accordingly, the crack growth rate. It is proposed to consider as a promising direction the transition to solving a three-dimensional problem before the tip of the crack as is done in SY-models.

Keywords: structural element, macrocrack, stress state, stress intensity factor, plastic zone

Введение

Процесс разрушения конструктивных элементов (КЭ) или деталей механизмов при воздействии переменных по амплитуде нагрузок в подавляющем большинстве случаев связано с образованием и последующим ростом в них трещин. Механика разрушения, рассматривающая рост трещин зародилась в начале XX века, но получила интенсивное развитие только во второй его половине. Ключевыми работами, лежащими в основе современной теории роста макротрещин, можно считать труд Griffith [1], в котором был предложен энергетический подход к описанию роста трещины, и работа Irwin [2], где впервые был предложен силовой параметр, коэффициент интенсивности напряжений (КИН), определяющий напряженно-деформированное состояние (НДС) перед кончиком трещины. В основу нового подхода к решению задачи о прочности КЭ под воздействием переменных нагрузок были положены механизмы зарождения и последующего роста трещин. В отличие от ранее доминирующего подхода, когда усталостное

разрушение рассматривалось как непрерывный процесс накопления рассеянных по всему объему КЭ микрповреждений, в новом подходе долговечность КЭ определяется продолжительностью стадий зарождения и последующего развития трещины [3, 4]. Таким образом, разрушение принимает локальный характер, где основным объектом изучения является трещина. Для понимания природы многих эффектов, имеющих место при воздействии циклической нагрузки, следует исследовать кинетику трещины. Этому вопросу посвящены многие работы, например, [5-10].

Целью данной статьи является анализ результатов наиболее интересных в этом направлении работ.

Кинетика кончика трещины

Из всех работ, посвященных данной проблеме, следует особо выделить исследование Riddell [5], который рассмотрел вопрос количественной оценки величины нагрузки, соответствующей полному раскрытию берегов трещины, в широком интервале значений коэффициента асимметрии цикла напряжений. Схематично ки-

нетика трещины, характеризуемая процессом расхождения ее свободных поверхностей (берегов трещины) показана на рис. 1. Для наглядности на берегах трещины были выбраны симметрично (одна под другой) реперные точки в непосредственной близости от кончика трещины на расстояниях 0,004 мм (точка 1), 0,70 мм (точка 2) и 0,105 мм (точка 3). Испытания проводились на компактных образцах толщиной 2 мм алюминиевого сплава AA 8009 ($\sigma_y=482$ МПа, $E=82$ ГПа) в диапазоне значений коэффициента асимметрии напряжений $R=0,1 \dots 0,7$. Исходя из использованных автором размеров образца, можно отметить, что перед трещиной формировалось плоское напряженное состояние (ПНС), при котором геометрия и размер пластической зоны существенно отличается от плоского деформированного состояния (ПДС).

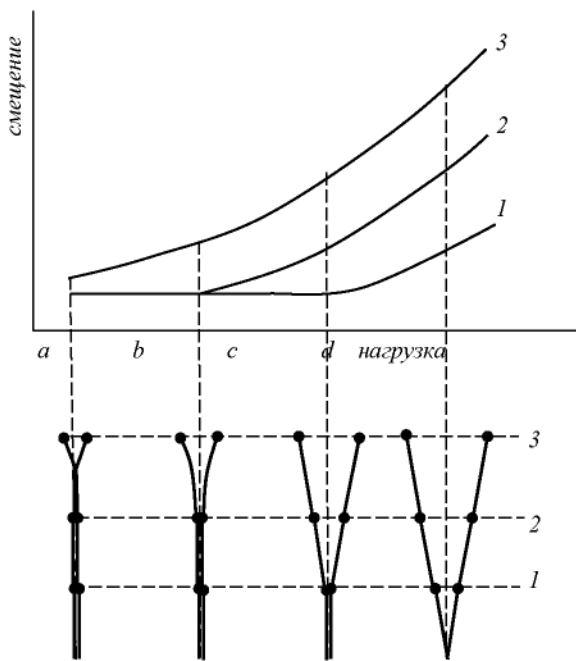


Рисунок 1 – Раскрытие берегов трещины

Основные результаты наблюдений за кинетикой трещины приведены на рис. 1. Видно, что уже при небольшой нагрузке имеет место смещение друг относительно друга (расхождение) точек #3. Авторами [5] были использованы термины “частичное раскрытие” и “полное раскрытие”. Так, при начальной нагрузке наиболее удаленные точки #3 частично раскрываются, в то время как точки #1 и #2 находятся в закрытом состоянии. При дальнейшем повышении нагрузки до уровня “b”, получают частичное раскрытие точки #2 и остаются частично раскрытыми точки #3, точки #1 по-прежнему остаются закрытыми. Только при уровне нагрузке “с” точки #1 оказываются частично раскрыты, а при уровне “d” все точки оказываются полностью раскрытыми,

трещина открывается полностью, включая свою вершину. Дальнейшее увеличение нагрузки за уровень “d” приводит к линейной зависимости кривой “смещение-нагрузка”. Приведенные в работе результаты исследования указывают на нелинейное изменение геометрии трещины под нагрузкой.

Чувствительность данной кривой к изменению геометрии трещины широко используется при определении величины раскрытия вершины трещины “CrackTipOpeningDisplacement” (CTOD), одного из наиболее используемого в расчетах параметра. Изначальное моделирование раскрытия трещины было осуществлено Wells [9] на основе решения для идеально упругого тела относительно горизонтального, u , и вертикального, v , перемещений.

Для случая трещины отрыва (тип I) при $\theta = 180^\circ$, величина вертикального смещения, ϑ , определяется по формуле

$$\vartheta = 4 \frac{K}{E'} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \quad (1)$$

где $E' = \begin{cases} E/(1 - \nu^2) & \text{– ПДС} \\ E & \text{– ПНС} \end{cases}$, K – КИН, r – расстояние от кончика трещины.

Величина раскрытия устья трещины, δ , равна двум вертикальным перемещениям (1). По (1) видно, что раскрытие берегов трещины зависит от положения места определения, а при $r=0$, раскрытие кончика равно нулю. Учитывая, в отличие от упругого решения, наличие пластической зоны перед кончиком реальной трещины, и принимая за эффективный размер трещины, a_{eff} , размер физической (реальной) трещины, a , плюс размер пластической зоны, r_p , Wells развил свою модель до квазиупругого-пластичного тела (рис. 2), и предложил рассчитывать раскрытие у кончика трещины, δ , по формуле:

$$\delta = \frac{4}{\pi} \frac{K^2}{E' \sigma_y} \quad (2)$$

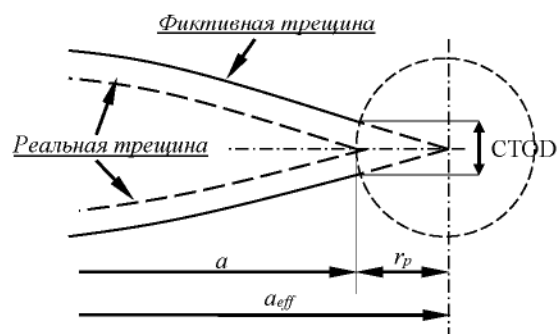


Рисунок 2 - Модель фиктивной трещины

Из формулы (2) видно, что раскрытие трещины непосредственно связано с величиной КИН. Таким образом, CTOD может служить в качестве параметра в соответствующих расчетах. Для

устранения разночтения по величине CTOD, Rice предложил определять местоположение точек, между которыми замеряется CTOD, на пересечении лучей прямого угла, вершина которого располагается в кончике реальной трещины, со сторонами физической трещины.

Рассмотренное выше понятие CTOD относится к случаю монотонного нагружения, когда не учитываются эффекты, сопутствующие стадии разгрузки при циклическом нагружении. Авторы [6] рассматривали изменение CTOD при постоянной и переменной амплитуде цикла нагружения. Для случая циклического нагружения образца из упругого идеально пластичного материала с краевой сквозной трещиной с постоянной амплитудой нагружения получена следующая формула раскрытия трещины, δ , для произвольного момента времени на стадии разгрузки:

$$\delta = \delta_{max} - \frac{(K_{max} - K)^2}{2E\sigma_y} = \delta_{max} - \frac{\lambda}{2}(\sigma_{max} - \sigma)^2 a, \quad (3)$$

где K_{max} , K , σ_{max} , σ – наибольшие и текущие значения КИН и напряжений за цикл, соответственно; a – длина трещины.

При последующем новом цикле нагружения величина раскрытия трещины в произвольный момент времени определяется по формуле

$$\delta = \delta_{min} + \frac{(K - K_{min})^2}{2E\sigma_y} = \delta_{min} + \frac{\lambda}{2}(\sigma - \sigma_{min})^2 a. \quad (4)$$

Две последние формулы определяют величину раскрытия трещины для первого цикла нагружения определенной амплитуды. Если характер цикла остается неизменным и амплитуда напряжений не меняется, то с помощью этих же формул можно проследить за изменением раскрытия трещины при дальнейшем нагружении.

Наличие в районе кончика трещины остаточных пластических деформаций существенно влияет на распределение напряжения в зоне предразрушения и кинетику трещины, например, открытие ее вершины. McClung в работе [12] предложил оценивать размер циклической пластической зоны перед трещиной с учетом эффекта ее закрытия по формуле:

$$\Delta r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta K_{eff}}{2\sigma_y + (\sigma_{op} - \sigma_{min})} \right)^2 \quad (5)$$

Нетрудно заметить, что при отсутствии явления закрытия трещины или его не учёта, когда $\sigma_{min} = \sigma_{op}$, размер циклической пластической зоны перед трещиной равен

$$\Delta r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K}{2\sigma_y} \right)^2 = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_y} \right)^2 = \frac{1}{4} r_p, \quad (6)$$

т.е. в четыре раза меньше размера монотонной пластической зоны (МПЗ), образующейся при первом цикле нагружения.

Явление закрытия берегов трещины

Отмеченная выше нелинейность в поведении геометрии движущейся трещины объясняется явлением закрытия берегов трещины, которое было впервые описано Elber в работе [13], где он исследовал рост центральной сквозной трещины в плоском образце при циклическом нагружении с постоянной амплитудой. Для проведения фрактрографического исследования поверхности разрушения исследователями был выполнен пропил с одной стороны, что привело к "достаточно большой деформации образца, заметной на невооруженный глаз" [13]. Elber установил, что берега растущей трещины остаются частично сомкнутыми даже при значительной растягивающей внешней нагрузке. Сегодня это кажется вполне понятным явлением, но до Elber считалось, например, Rice [14], что при растягивающей внешней нагрузке берега трещины должны открываться. Оказывается, это справедливо для неподвижной трещины, когда пластическая зона расположена только перед ее кончиком. Elber предположил, что поскольку при сомкнутых берегах трещины пропадает сингулярность напряжений, постольку отсутствуют условия для роста трещины, и только когда она полностью "раскрывается", тогда снова появятся условия для ее дальнейшего развития. Поэтому в кинетическое уравнение роста трещины Elber предложил подставлять не номинальный размах КИН, ΔK , а только его эффективную часть, $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$, где K_{op} – КИН, соответствующий нагрузке открытия берегов трещины. Явление закрытия трещины особенно заметно в случае пластичных материалов в условиях ПНС, когда отсутствует стеснение деформированию материала. Данный вид закрытия трещины, рассмотренный Elber, обусловлен созданием следа (полосы) за вершиной трещины пластически деформированного материала, который выполняет роль клина, "вбитого" между берегами трещины. В дальнейшем исследователями были установлены и другие причины, обуславливающие смыкание берегов трещины, это:

- наличие шероховатости поверхности разрушения, когда имеет место относительное смещение вершин и впадин поверхности излома и, соответственно, несовпадение в полуцикле разгрузки;

- наличие продуктов коррозии вблизи кончика трещины, которая образуется при работе конструкции в агрессивной среде;
- гидравлическое давление при быстром смыкании берегов трещины.

Рассмотрим явление закрытия трещины, обусловленное пластической деформацией материала. Данному типу явления было посвящено большинство исследований. Из последних следует отметить работы [15-21]. Природа этого явления в существенной мере зависит от характера НДС перед кончиком трещины.

В случае ПНС объяснение явления закрытия трещины принимается всем научным сообществом. При росте трещины перед ее кончиком постоянно присутствует область пластически деформированного материала (пластическая зона), объем которой больше первоначального. По мере продвижения трещины этот пластически деформированный материал остается позади ее кончика и образует пластические "полосы". При разгрузке образца эти полосы смыкают раньше, чем внешняя нагрузка достигнет нуля, тем самым подвергаясь сжатию со стороны окружающего упруго деформированного материала. Остаточные напряжения сжатия, имеющие место в пластическом следе, объясняют и явления "позднего" открытия берегов трещины (закрытие трещины), и влияние среднего напряжения (асимметрии цикла), а также влияние предыстории нагружения и даже аномальный рост малых трещин. На этом строятся многие известные модели прогнозирования роста трещины. Однако,

достаточно понятное объяснение появления "дополнительного" пластически деформированного материала при плоском напряженном состоянии, не находит понимания при ПДС, где, по определению, деформирование происходит в плоскости, т.е. отсутствует возможность появления такого дополнительного материала.

При плоской деформации в следе за кончиком трещины $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = 0$. В действительности, увеличение объема за счет пластически деформированного материала очень мало, и составляет величину порядка 10^{-4} . Таким образом, пластический клин, какой имеет место при ПНС, в случае ПДС отсутствует. Однако, материал в следе за трещиной пластически деформирован посредством сдвига микрообъемов, схематично представленный на рис.3.

В результате, образуется локальный клин сразу за кончиком трещины. В работе [15] при-

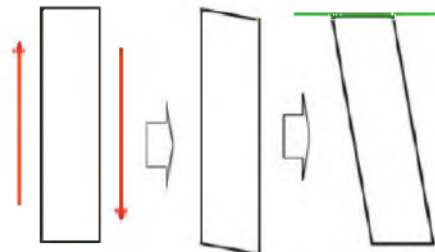


Рисунок 3 - Сдвиг микрообъемов в следе трещины

ведено графическое сравнение механизма образования пластического следа трещины при ПДС и ПНС, что и показано на рис.4.

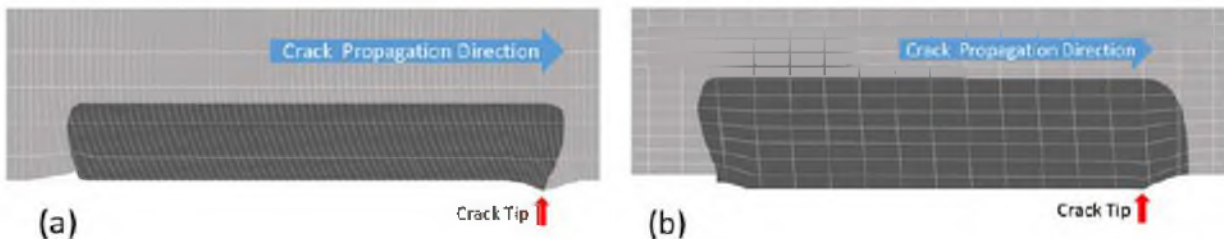


Рисунок 4 - Графическое сравнение процессов образования пластического следа при ПДС (а) и ПНС (б), по [15]

На рисунке представлены верхние половинки образцов, рассеченные по плоскости трещины. В обоих случаях испытание проходили при постоянных амплитудах, движение трещины слева-направо. Пластически деформированный материал показан темным цветом. Автором показан характер деформирования отдельных элементов объема материала. Как отмечалось выше, при ПНС (б) происходит их удлинение, что и объясняет появление "дополнительного" материала, образующего клин между поверхностями

трещины. При ПДС (а) вследствие высокой степени стеснения деформированию происходит сдвиг микрообъемов материала и перенос их к кончику трещины, где и образуется "горб" за счет сравнительно небольшого объема "дополнительного" материала. Размер этого "горба" соизмерим с размером МПЗ. В действительности, в КЭ трещины растут в смешанном режиме: в центре сечения реализуется ПДС, а у поверхности – ПНС, что наблюдается и при испытании лабораторных образцов.

Явление закрытия трещины может быть обусловлено микрошероховатостью изломаповерхностей трещины. Даже в случае трещины отрыва, анизотропия механических свойств и неоднородность структуры конструкционных материалов приводит к локальным смещениям берегов трещины по типу II и III. Наблюдается несовпадение рельефа поверхностей трещины при разгрузке, приводящее к преждевременному смыканию ее берегов. Данный сценарий проявления явления закрытия трещины особенно характерен для припороговых скоростей роста трещины, когда размер МПЗ сопоставим или меньше размера зерна поликристаллического материала и асимметрия деформаций наиболее заметна.

Следующей причиной проявления закрытия трещины могут быть продукты коррозии, возникающие при работе конструкций как при обычных, так и повышенных температурах в условиях поверхностно-активных сред. Вновь образующиеся ювенильные поверхности трещины подвергаются процессу окисления при влажной окружающей среде. Толщина окисных пленок составляет всего несколько нанометров, но вследствие непрерывного процесса их разрушения при деформировании КЭ (образцов) и трении поверхностей трещины, образуются новые слои, достигающие толщин порядка 100 нанометров. Этот сценарий особенно вероятен при низких значениях коэффициента асимметрии цикла напряжений и очень низких припороговых скоростях трещины. Явление закрытия трещины вследствие коррозионных процессов в полости трещины, позволяет объяснить некоторые закономерности скорости роста трещины при размахах КИН, близких к пороговому значению, а именно:

- повышение значения ΔK_{th} при низких R при испытании во влажной среде;
- неожиданное проявление влияния предыстории нагружения, например, амплитуды напряжений ниже пороговых значений могут снизить СРТ при последующем нагружении.

Известна и иная природа явления закрытия трещины, например, вследствие наличия неровностей поверхности трещины (возможно, искусственного характера). Установлено, что снижение скорости роста трещины при таком типе закрытия трещины значительно меньше, чем ожидаемое при $K_{max} - K_{op}$. Эффект снижения скорости роста трещины зависит от многих факторов: габарита неровности (по ширине и

высоте), ее расположения от кончика трещины, количества неровностей.

Несмотря на многообразие явления закрытия трещины, наибольший практический интерес представляет механизм, обусловленный пластическим деформированием материала. В основе большинства известных моделей роста трещины положен именно этот механизм.

Выводы

Анализ результатов исследований, посвященных вопросу изменения геометрии трещины при циклическом нагружении, показал следующее:

- 1) кинетика геометрии растущей трещины заметно отличается от аналогичных характеристик неподвижной трещины, в первую очередь за счет образования при росте трещины на ее берегах пластически деформированного материала;
- 2) в случае реализации перед трещиной ПНС проявляется эффект закрытия трещины, заметно снижающий величину эффективного размаха КИН, и, соответственно, скорость роста трещины;
- 3) существенное влияние на кинетику геометрии трещины оказывает напряженно-деформированное состояние, изменяющее механизм образования пластически деформированного материала на ее берегах;
- 4) имеется связь между величиной раскрытием трещины, СТOD, и КИН, что позволяет использовать СТOD при оценке размера пластической зоны перед трещиной;
- 5) перспективным направлением улучшения существующих методов прогнозирования является переход к решению трехмерной задачи перед кончиком трещины, как это делается в SY-моделях.

Литература

1. Griffith, A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // Philos. Trans. Of Roy. Soc. of London. – 1920. – Ser. A. - Vol. 221. - P. 163-198.
2. Irwin, G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate / G. R. Irwin // ASME J. Appl. Mech. – 1957. - Vol. 24. - P. 361-364.
3. Файвисович, А.В. Приближенный метод оценки продолжительности начальной стадии усталостного разрушения судовых гребных валов/ А.В. Файвисович, М.Н. Чура // Транспортное дело России. – 2011. – №10. – С.79-80.
4. Чура, М.Н. Эксплуатационные повреждения гребных валов / М.Н. Чура, А.В. Файвисович // Транспортное дело России. – 2011. - №11. – С. 110.– 112.
5. Riddell, W.T. Determining fatigue crack opening loads from near-crack-tip displacement measurements / W.T. Riddell, R.S. Piascik, M.A. Sutton, W. Zhao,

- S.R. McNeill, J.D. Helm // American Society for Testing and Materials. – 1999. - P. 157 - 174.
6. Liu, Y. A simple analytical crack tip opening displacement approximation under random variable loadings / Y. Liu, Z. Lu, J. Xu // International Journal of Fracture. – 2012. -Vol. 173. - P. 189 – 201.
 7. Lu, Z. An incremental crack growth model for multi-scale fatigue analysis / Z.Lu, Y. Liu // In 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structural Dynamics and Materials Conference. - 2009.
 8. Lu, Z. Curvilinear fatigue crack growth simulation and validation under constant amplitude and overload loadings / Z. Lu, J. Xu, L. Wang, J. Zhang, Y. Liu // [Journal of Aerospace Engineering](#). – 2015. - Vol. 28.
 9. Xiang, Y. Equivalent stress transformation for efficient probabilistic fatigue crack growth analysis under variable amplitude loadings / Y. Xiang, Y. Liu // [Journal of Aerospace Engineering](#). - 2016. - Vol. 29.
 10. Lu, Z. Small time scale fatigue crack growth analysis / Z. Lu, Y. Liu // International Journal of Fatigue. – 2010. - Vol. 32. - P. 1306 – 1321.
 11. Wells, A.A. Unstable crack propagation in metals-cleavage and fast fracture / A.A. Wells // Proceedings of the Cranfield Crack Propagation Symposium. – 1961. - Vol. 1. - P. 210 - 230.
 12. McClung, R.C. Crack closure and plastic zone size in fatigue / R.C. McClung // Fatigue Fracture Engineering Material Structure. – 1991. - Vol. 14. - P. 455 – 468.
 13. Elber, W. Fatigue crack growth under cyclic tension / W. Elber // Engineering Fracture Mechanics. – 1970. - Vol. 2. - P. 37 - 45.
 14. Rice, J.R. Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue / J.R. Rice // Fatigue Crack Propagation: ASTM STP 415. - 1967. - P. 247-309.
 15. Pippan, R. Fatigue crack closure: a review of the physical phenomena / R. Pippan, A. Hohenwarter // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2017. – Vol. 40. – P. 471 – 495.
 16. Kemp, R.M.J. Fatigue crack closure – a review / R.M.J. Kemp // Technical Report 90046 ICAF Document 1776: Royal Aerospace Establishment, UK. – 1990. – 68 p.
 17. de Matos, P.F.P. On the accurate assessment of crack opening and closing stresses in plasticity-induced fatigue crack closure problems / P.F.P. de Matos, D. Nowell // Engineering Fracture Mechanics. – 2007. – Vol. 74. – P. 1579 – 1601.
 18. Codrington, J. Investigation of plasticity-induced fatigue crack closure / J. Codrington, A. Kotousov // 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM, Australia. – 2007.
 19. Yang, J. Existence and insufficiency of the crack closure for fatigue crack growth analysis / J. Yang, W. Zhang, Y. Liu // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 62. – P.144 – 153.
 20. Файвисович, А.В. Экспериментальная оценка изменения величины КИН вдоль фронта поверхностной трещины / А.В. Файвисович // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1996. – №3. – С. 45 – 48.
 21. Antunes, F. V. Empirical model for plasticity-induced crack closure based on K_{max} and ΔK / F. V. Antunes, A. G. Chegini, D. Camas, L. Correia // Fatigue Fract Engng Mater Struct. – 2015. – P.1 – 14.

References

1. Griffith, A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // Philos. Trans. Of Roy. Soc. of London. – 1920. – Ser. A. - Vol. 221. - P. 163-198.
2. Irwin, G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate / G. R. Irwin // ASME J. Appl. Mech. – 1957. - Vol. 24. - P. 361-364.
3. Fayvisovich, A.V. Pribligonniy metod ocenki prodolgitelnosti nachalnoy stadia ustalostnogo razrusheniya sudovih grebnihi valov / A.V. Fayvisovich, M.N. Chura // Transportnoe delo Rossii. – 2011. - №10. – S.79-80.
4. Chura, M.N. Explutacionnie povregdeniya grebnihi valov. / M.N. Chura, A.V. Fayvisovich // Transportnoe delo Rossii. – 2011. - №11. – С. 110-112.
5. Riddell, W.T. Determining fatigue crack opening loads from near-crack-tip displacement measurements / W.T. Riddell, R.S. Piascik, M.A. Sutton, W. Zhao, S.R. McNeill, J.D. Helm // American Society for Testing and Materials. – 1999. - P. 157 - 174.
6. Liu, Y. A simple analytical crack tip opening displacement approximation under random variable loadings / Y. Liu, Z. Lu, J. Xu // International Journal of Fracture. – 2012. - Vol. 173. - P. 189 – 201.
7. Lu, Z. An incremental crack growth model for multi-scale fatigue analysis / Z.Lu, Y. Liu // In 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structural Dynamics and Materials Conference. - 2009.
8. Lu, Z. Curvilinear fatigue crack growth simulation and validation under constant amplitude and overload loadings / Z. Lu, J. Xu, L. Wang, J. Zhang, Y. Liu // [Journal of Aerospace Engineering](#). – 2015. - Vol. 28.
9. Xiang, Y. Equivalent stress transformation for efficient probabilistic fatigue crack growth analysis under variable amplitude loadings / Y. Xiang, Y. Liu // [Journal of Aerospace Engineering](#). - 2016. - Vol. 29.
10. Lu, Z. Small time scale fatigue crack growth analysis / Z. Lu, Y. Liu // International Journal of Fatigue. – 2010. - Vol. 32. - P. 1306 – 1321.
11. Wells, A.A. Unstable crack propagation in metals-cleavage and fast fracture / A.A. Wells // Proceedings of the Cranfield Crack Propagation Symposium. – 1961. - Vol. 1. - P. 210 - 230.
12. McClung, R.C. Crack closure and plastic zone size in fatigue / R.C. McClung // Fatigue Fracture Engineering Material Structure. – 1991. - Vol. 14. - P. 455 – 468.
13. Elber, W. Fatigue crack growth under cyclic tension / W. Elber // Engineering Fracture Mechanics. – 1970. - Vol. 2. - P. 37 - 45.
14. Rice, J.R. Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue / J.R. Rice // Fatigue Crack Propagation: ASTM STP 415. - 1967. - P. 247-309.
15. Pippan, R. Fatigue crack closure: a review of the physical phenomena / R. Pippan, A. Hohenwarter // Fatigue

- & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2017. – Vol. 40. – P. 471 – 495.
16. Kemp, R.M.J. Fatigue crack closure – a review / R.M.J. Kemp // Technical Report 90046 ICAF Document 1776: Royal Aerospace Establishment, UK. – 1990. – 68 p.
 17. de Matos, P.F.P. On the accurate assessment of crack opening and closing stresses in plasticity-induced fatigue crack closure problems / P.F.P. de Matos, D. Nowell // Engineering Fracture Mechanics. – 2007. – Vol. 74. – P. 1579 – 1601.
 18. Codrington, J. Investigation of plasticity-induced fatigue crack closure / J. Codrington, A. Kotousov // 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM, Australia. – 2007.
 19. Yang, J. Existence and insufficiency of the crack closure for fatigue crack growth analysis / J. Yang, W. Zhang, Y. Liu // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 62. – P.144 – 153.
 20. Fayvisovich, A.V. Experimentalnaya ocenka izmeneniya velichini KIN vdol fronta poverhnostnoy treschiny / A.V. Fayvisovich // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. – 1996. – №3. – С. 45-48.
 21. Antunes, F. V. Empirical model for plasticity-induced crack closure based on K_{max} and ΔK / F. V. Antunes, A. G. Chegini, D. Camas, L. Correia // Fatigue Fract Engng Mater Struct. – 2015. – P.1 – 14.

УДК 504.3.054: 621.43.068.4
DOI: 10.34046/aumsuomt90-13

ВЗАИМОСВЯЗЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И НЕОРГАНИЗОВАННОГО ТУРИЗМА НА АКВАТОРИЮ ЗАПОВЕДНИКА «УТРИШ»

Т.Б. Кузнецова, аспирант

В.А. Туркин, доктор технических наук, профессор

Актуальность исследования заключается в том, что на сегодняшний день, в российском научном и сетевом пространстве полностью отсутствуют публикации по теме воздействия судовых энергетических установок (СЭУ) на акватории особо охраняемых природных территорий (ООПТ), расположенных на Черноморском побережье. Тема воздействия СЭУ на акватории ООПТ активно рассматривается, преимущественно, для северных территорий Российской Федерации. А для ООПТ, в состав которых входит часть акватории Чёрного моря, такие исследования на сегодняшний день не существуют. Цель исследования данной статьи обусловлена заявленной проблемой – выявить взаимосвязь между неорганизованным туризмом в зоне лагун, входящих в состав заказника «Большой Утриш», и воздействием энергетических установок маломерных пассажирских судов на акваторию Государственного природного заповедника (ГПЗ) «Утриш». Основные методы исследования – наблюдение, картографический анализ границ ГПЗ «Утриш», сравнительный анализ статуса заповедника и статуса заказника. Основным результатом заключается в том, что по итогу проведенного исследования выявлена и обоснована прямая взаимосвязь наличия и распространения неорганизованного туризма в зоне лагун и спроса на трансфер маломерных пассажирских судов в непосредственной близости от границ заповедника «Утриш». В соответствии с полученным результатом, можно сделать вывод о том, что существующий активный трансфер судов, оборудованных СЭУ, создаёт условия для негативного воздействия последних на акваторию заповедника «Утриш».

Ключевые слова: особо охраняемая природная территория, акватория, Государственный природный заповедник «Утриш», судовые энергетические установки, маломерные пассажирские суда, неорганизованный туризм, лагуны, «морской коридор», границы заповедника

The relevance of the study lies in the fact that today, in the Russian scientific and network space there are no publications on the impact of shipboard power plants (SPP) in the waters of specially protected natural areas located on the Black Sea coast. The topic of the impact of the SPP on the protected areas of the protected areas is actively considered, mainly for the northern territories of the Russian Federation. And for specially protected natural areas that include part of the Black Sea area, such studies do not exist today. The purpose of the study of this article is due to the stated problem - to identify the relationship between unorganized tourism in the lagoon zone, which is part of the Big Utrish reserve, and the impact of power plants of small passenger ships on the water area of the Utrish State Nature Reserve. The main research methods are observation, a cartographic analysis of the Utrish boundaries, a comparative analysis of the status of the reserve and the status of the reserve. The main result is that, based on the results of the study, a direct relationship between the presence and distribution of unorganized tourism in the lagoon area and the demand for transfer of small passenger ships in the immediate vicinity of the borders of the Utrish reserve has been identified and substantiated. In accordance with the result obtained, it can be concluded that the existing active transfer of vessels equipped with an SPP creates conditions for the latter to adversely affect the water area of the Utrish reserve.

Keywords: specially protected natural areas, water area, Utrish State Nature Reserve, ship power plants, small-size passenger ships, unorganized tourism, lagoons, «sea corridor», reserve borders.

Введение. Актуальность исследования обусловлена тем, что в зоне лагун, входящих в

состав заказника «Большой Утриш», активно развит неорганизованный, так называемый, «ди-