

Научная статья

УДК 629.73.05

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181876>

УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В ГЕРМЕТИЧНЫХ ОТСЕКАХ ОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Борис Васильевич Беляев¹, Алексей Сергеевич Лебедев²✉

^{1,2}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

²vka@mil.ru ✉

Аннотация. В данной статье выявлены критерии распространения трещин в оболочках герметичных отсеков и элементов космических станций в зависимости от характерных размеров трещин и возможных уровней эксплуатационных нагрузок. Представлены типовые диаграммы условий распространения поверхностных и сквозных трещин в элементах герметичных отсеков орбитальных космических средств. Данные диаграммы учитывают асимметрию цикла нагружения, внешние условия (вакуум и воздух). Формирование порогов усталости малых и коротких трещин также учтено указанными диаграммами. Полученные результаты представляют значительный интерес для оперативного диагностирования технического состояния орбитальных космических средств.

Ключевые слова: трещина, оболочка, утечка, остаточный ресурс, герметичность, диагностика, работоспособность, герметичный отсек

Для цитирования: Беляев Б.В., Лебедев А.С. Условия распространения трещин в герметичных отсеках орбитальных космических станций // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181876>

Original article

CONDITIONS OF CRACK PROPAGATION IN SEALED COMPARTMENTS OF ORBITAL SPACE STATIONS

Boris V. Belyaev¹, Alexey S. Lebedev²✉

^{1,2}Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky,
Saint Petersburg, Russia

²vka@mil.ru ✉

Abstract. Recently, the most pressing issue is the possible duration of the flight of orbiting spacecraft after a collision with objects of man-made origin. Even sufficiently small particle sizes can lead to damage to the elements of sealed compartments in the form of surface microcracks. The relevance of this task will increase in the coming years due to the current trend towards increasing pollution of near-Earth space by man-made particles, most of which are in near-Earth orbit. It is unacceptable to neglect the collision of orbital vehicles with such particles. In this regard, the diagnosis of failures of aircraft with damage in the form of cracks is of great importance, since it will allow to justify the duration of stay of orbital space assets in orbit for the possibility of performing the task assigned to them. The article develops criteria for the propagation of cracks in the elements of sealed compartments of space stations and spacecraft, depending

on the characteristic sizes of cracks and possible levels of operational loads. As a result of calculations performed in accordance with the developed criteria, as well as on the basis of experimental results, an assessment of the operability of structural elements of sealed compartments with surface cracks at various load levels was carried out, depending on the initial depth and shape of the crack, structural material and operating conditions environment. Typical diagrams of the propagation conditions of surface and through cracks in the elements of sealed compartments of orbiting spacecraft are presented. These diagrams take into account the asymmetry of the loading cycle, external conditions (vacuum and air), as well as the peculiarities of the formation of fatigue thresholds of small and short cracks. The results obtained are of considerable interest and make it possible to more quickly diagnose failures of aircraft operated in conditions of clogging of near-Earth space with objects of natural and artificial origin, the probability of collision with which increases every year.

Keywords: crack, shell, leak, residual life, tightness, diagnostics, operability, sealed compartment

For citation: Belyaev B.V., Lebedev A.S. Conditions of crack propagation in sealed compartments of orbital space stations. *Trudy MAI*, 2024, no. 137. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181876>

Введение

Для многих важных элементов и систем орбитальных космических средств основным свойством, характеризующим их работоспособность, является

герметичность. Данное свойство в условиях глубокого вакуума становится определяющим.

Появление трещин на поверхности оболочек герметичных отсеков и элементов систем орбитальных космических средств может быть обусловлено не только специфическими условиями орбитального полета (воздействие микрометеоритов и частиц космического мусора), но и технологическими особенностями их изготовления [1-2]. Наличие таких повреждений в виде поверхностных и сквозных трещин еще не означает нарушения работоспособного состояния элементов герметичных отсеков (систем) орбитальных космических средств, а также самих отсеков и систем. Поэтому, для оценки работоспособности отсеков и элементов систем орбитальных космических средств с трещинами необходимо, прежде всего, выявить условия распространения этих трещин в зависимости от их характерных размеров и возможных уровней эксплуатационных нагрузок.

Постановка задачи

Условия (критерии) распространения трещин необходимо определить для следующих характерных случаев:

- неустойчивое распространение трещин (неустойчивость трещин) под действием статической нагрузки (оболочки герметичных отсеков и элементов систем постоянно нагружены избыточным давлением содержащейся в них рабочей среды - газа либо жидкости);
- устойчивое (стабильное) распространение трещин в условиях циклического (термоциклического) нагружения (или рост усталостных трещин).

Теоретические исследования

Рассмотрим случай реализации неустойчивости трещин. Фронт исходной поверхностной трещины аппроксимировался полуэллипсом с соотношением полуосей $L = a_o/b_o$, значения которых соответствуют глубине и полудлине трещины по поверхности оболочки герметичного элемента. Условие неустойчивости по критерию Ирвина выполняется в случае, если значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_a в направлении толщины δ поврежденной оболочки герметичного отсека (системы) равно, либо больше критического значения $K_{c\delta}$, то есть:

$$K_a \geq K_{c\delta} \quad (1)$$

Учитывая, что основным фактором, определяющим напряженно-деформированное состояние (НДС) оболочек элементов герметичных отсеков (систем), является внутреннее давление рабочей среды p , а наиболее опасными будут трещины, расположенные вдоль образующей цилиндрической оболочки радиусом R , критерий (условие) неустойчивости поверхностной трещины может быть представлен в следующем виде:

$$a_o \geq a_c = \left(\frac{K_{c\delta} \cdot \Phi \cdot \delta / R}{1,12\sqrt{\pi} \cdot M_k \cdot p} \right)^2, \quad (2)$$

где a_o , a_c – исходное (начальное) и критическое значение глубины поверхностной трещины;

M_k – коэффициент увеличения интенсивности напряжений Кобаяши;

Φ – эллиптический интеграл второго рода, зависящий от формы поверхностной трещины.

Для высоконагруженных элементов систем критерий (2) удобнее выразить через давление p_{1c} , необходимое для возникновения процесса неустойчивого развития поверхностных трещин. Разлагая функцию Φ в ряд, можно получить следующее выражение:

$$p \geq p_{1c} = \frac{\pi / 8(3 + a_o^2 / b_o^2) \cdot K_{c\delta}}{1,12M_k \sqrt{\pi a_o R / \delta}}, \quad (3)$$

где a_o/b_o – исходная форма поверхностной трещины.

Таким образом, при выполнении условий (1) – (3) появившаяся поверхностная трещина будет неустойчивой и «прорастет» сквозь стенку оболочки, что приведет к образованию сквозной трещины и истечению через нее рабочего вещества в виде газа или жидкости. Образовавшаяся сквозная трещина также может быть неустойчивой, если ее размер (длина) l_o будет не менее критического l_c , т.е. $l_o \geq l_c$, что соответствует условию:

$$K_1 \geq K_c, \quad (4)$$

где K_c – вязкость разрушения материала оболочки в продольном либо в поперечном направлении.

Выражение для давления p_{2c} , вызывающего нестабильное распространение сквозной (проросшей) трещины вдоль образующей поврежденной оболочки, будет иметь вид:

$$p_{2c} = \frac{K_c \delta / R}{\sqrt{\pi l} \cdot Y(l)}, \quad (5)$$

где $Y(l)$ – поправочная функция, учитывающая конфигурацию оболочки с трещиной и характер распределения напряжений σ .

Необходимо заметить, что в (4) критическое значение коэффициента интенсивности напряжений берется для плоского напряженного состояния, тогда как в (1) – для плоской деформации. Кроме того, уровень касательных напряжений в оболочках герметичных элементов относительно невелик, что позволяет ограничиться рассмотрением трещин первого типа (нормального отрыва). В случае наклонного расположения трещин следует использовать проекции их основных размеров на плоскость, перпендикулярную максимальным напряжениям. При использовании данных критериев необходимо также учитывать поправку на зону пластичности, которая по существу является коррекцией размера трещины. Заметим, что вопросы неустойчивости трещин довольно подробно рассмотрены в литературе [3, 4, 6-8].

Случай устойчивого распространения усталостных трещин (РУТ). Как показывает анализ условий эксплуатации орбитальных станций, РУТ в оболочках элементов герметичных отсеков и систем будет определяться следующими факторами:

– циклическим изменением температурных напряжений $\Delta\sigma_t$ в поврежденных элементах герметичных отсеков, связанным с перепадом температур ΔT в результате их периодического нахождения на теневой и солнечной стороне орбиты;

– периодическим изменением внутреннего давления Δp рабочей среды в герметичных элементах систем.

Под действием термоциклических $\Delta\sigma_t$ либо циклических $\Delta\sigma$ напряжений появившиеся трещины будут развиваться лишь при значениях коэффициента интенсивности напряжений выше порогового значения K_{th} . Условие распространения трещин при циклическом нагружении (условие существования ненулевой скорости РУТ) будет иметь вид:

$$\Delta K > \Delta K_{th} \quad (6)$$

Условие (6) может быть представлено в следующем виде

$$a_o > \left[\frac{\Delta K_{th} \Phi}{1,12 M_k \sqrt{\pi} \Delta \sigma} \right]^2 \quad (7)$$

$$l_o > \left[\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma \sqrt{\pi} \cdot Y(l)} \right]^2 \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) размах напряжений $\Delta\sigma$ определяется значениями действующих факторов – ΔT либо Δp .

При использовании условий (6) – (8) необходимо учитывать проявление эффекта малых и коротких трещин, так как именно они оказывают существенное

влияние на работоспособность тонкостенных оболочек элементов герметичных отсеков и систем. В данном контексте под малыми трещинами подразумеваются поверхностные трещины, под короткими – сквозные. Особенность формирования порогов усталости в случае малых и коротких трещин заключается в их повышенной способности развиваться при размахе коэффициента интенсивности напряжений ниже порогового значения ($\Delta K < \Delta K_{th}$) и напряжении выше предела σ_{-1} выносливости ($\Delta\sigma > \sigma_{-1}$) [5, 9-13]. С учетом этого, критерии распространения малых и коротких трещин будут иметь вид:

$$\sigma_{-1} \sqrt{\pi a_3} \cdot Y(a) > \Delta K_{th} \quad (9)$$

$$\sigma_{-1} \sqrt{\pi l_3} \cdot Y(l) > \Delta K_{th}, \quad (10)$$

где $a_3(l_3)$ – эквивалентный размер трещины, являющийся постоянной материала оболочки в заданных условиях эксплуатации.

Эквивалентный размер трещины может быть определен из данных соотношений при условии $\Delta K = \Delta K_{th}$:

$$a_3 = \left[\frac{\Delta K_{th}}{\sigma_{-1} \cdot Y(a)} \right]^2 \frac{1}{\pi} \quad (11)$$

$$l_3 = \left[\frac{\Delta K_{th}}{\sigma_{-1} \cdot Y(l)} \right]^2 \frac{1}{\pi} \quad (12)$$

При размерах трещин, меньших эквивалентного размера, порог усталости ΔK_{th} уже не является инвариантным к размеру трещины и уменьшается с уменьшением их характерного размера.

На рисунке 1 представлены типовые диаграммы условий распространения поверхностных и сквозных трещин в оболочках элементов герметичных отсеков (систем) орбитальных космических средств. Данные диаграммы построены в логарифмических координатах «характерные размеры трещины – уровень нагрузки». Они учитывают асимметрию цикла нагружения, внешние условия (вакуум и воздух), а также особенности формирования порогов усталости малых и коротких трещин. Каждая диаграмма состоит из трех областей. Область I является областью нулевых скоростей, в которой размер исходной трещины остается практически неизменным в процессе всего времени активного функционирования орбитального космического средства. Область II представляет собой область устойчивого распространения трещин в условиях циклического (термоциклического) нагружения. Область III характеризует нестабильное распространение трещин [14-20].

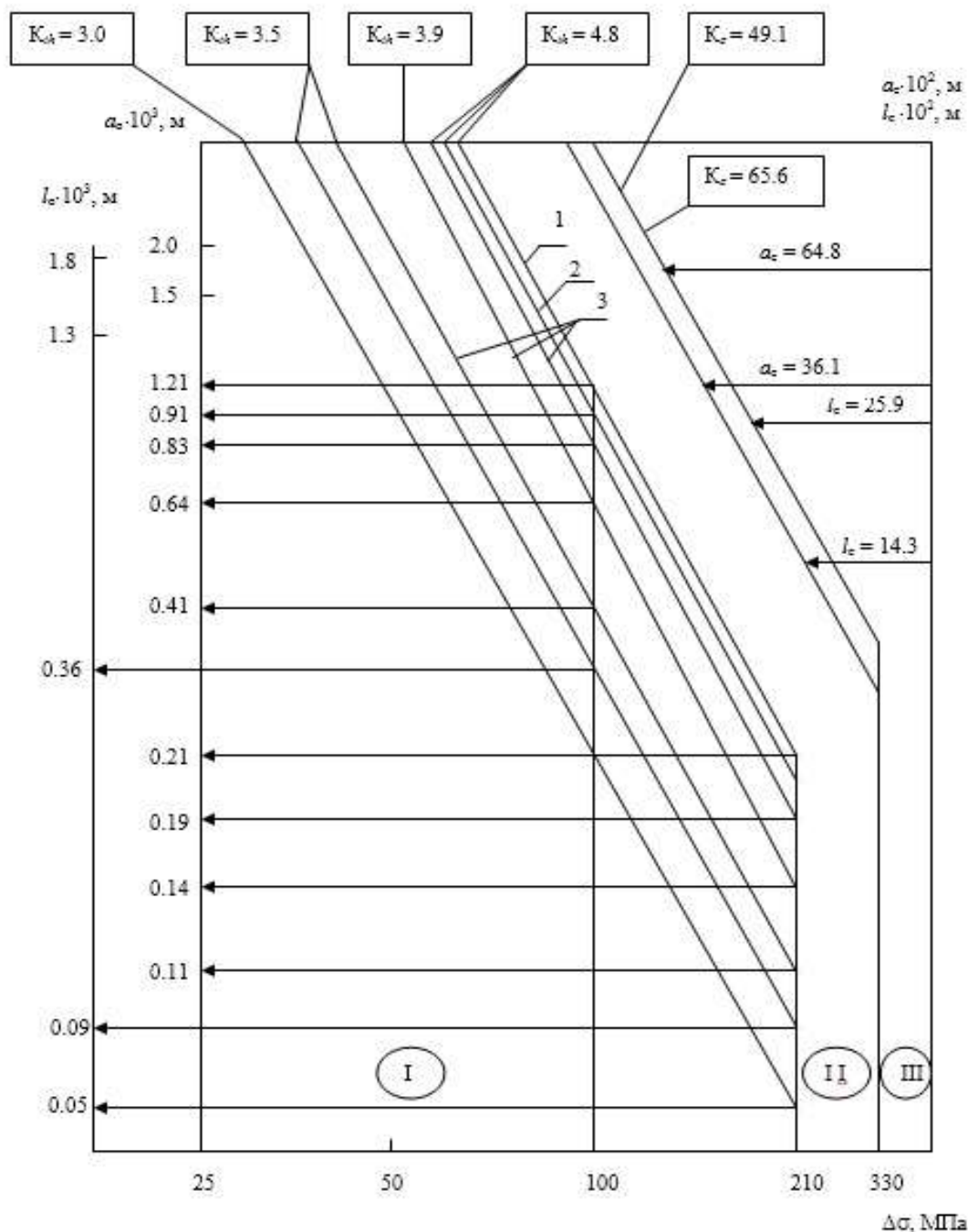


Рисунок 1 Условия распространения поверхностных и сквозных трещин:
 1. – $a_0/b_0 = 1.0$; 2. – $a_0/b_0 = 0.3$; 3. – $a_0/b_0 = 0.1$.

Как показывают расчеты, для оболочек герметичных отсеков и систем, нагруженных внутренним давлением $p \leq 0,15$ МПа, критическая глубина поверхностной трещины намного превышает толщину стенки герметичного элемента. Таким образом, для гермоотсеков условия неустойчивости поверхностных

трещин выполняться не будут. Для высоконагруженных элементов, например для шар-баллонов, изготовленных из сплава АМгбМ, с отношением $R/\delta \geq 100$, критическое давление, приводящее к нестабильному распространению поверхностной трещины исходной глубины $a_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м, не будет превышать $p_{1c} = 2,9$ МПа.

Заключение

Данные диаграммы позволяют не только выявить условия распространения появившихся трещин и, тем самым, оперативно оценить работоспособность герметичных элементов с трещинами, но и разработать ряд практических рекомендаций, направленных на повышение живучести герметичных элементов орбитальных космических средств на стадии распространения усталостных трещин [20-24].

Список источников

1. Баркова М.Е. Космический аппарат для утилизации космического мусора в околоземном пространстве // Труды МАИ. 2014. № 75. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35927>
2. Брок Д. Основы механики разрушения / Пер. с англ. – М.: Высшая школа, 1980. - 368 с.

3. Романив О.Н., Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н. и др. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов: Т. 4 Механика разрушения и прочность материалов. - Киев: Наукова думка, 1990. - 680 с.
4. Фролов Е.С., Минайчев В.Е. Вакуумная техника: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 360 с.
5. Голубев А.И., Кондаков Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник. - М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
6. Панасюк В.В. Механика разрушения и прочность материалов. - Киев: Наукова думка, 1988 – 1990.
7. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Ковчик С.Е. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – Киев: Наукова думка, 1977. – 277 с.
8. Трощенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.
9. Кузнецов Е.Б., Леонов С.С. Математическое моделирование чистого изгиба балки из авиационного материала в условиях ползучести // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35927>
10. Ендогур А.И., Кравцов В.А. Напряженное состояние композиционной панели в зоне отверстия // Труды МАИ. 2013. № 64. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36558>
11. Голуб В.П., Плащинская А.В. О влиянии концевой пластической зоны на рост усталостных трещин в изотропных пластинках при одноосном растяжении-сжатии // Теоретическая и прикладная механика. 2003. № 38. С. 91-96.

12. Antunes F.V., Chegini F.G., Branco R., Camas D. A numerical study of plasticity induced crack closure under plane strain conditions // International Journal of Fatigue, 2015, no. 71, pp. 75-86. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.03.016>
13. Yates J.R., Zanganeh M., Tomlinson R.A., Brown M.W., Garrido F.A. Crack paths under mixed mode loading // Engineering Fracture Mechanics, 2008, no. 75, pp. 319-330.
14. Шакиртов М.М., Шабанов А.П., Корнев В.М. Построение диаграмм разрушения для пластин с трещиновидным дефектом на основе необходимых и достаточных критериев // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54. № 2. С. 163-170.
15. Шакиртов М.М. О влиянии коэффициента асимметрии цикла внешней нагрузки на характеристики цикла нагружения материала при вершине трещиновидного дефекта // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75559>
16. Шабанов А.П. О механизме роста усталостной трещины в поле внешних сжимающих напряжений // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46. № 6. С. 108-115.
17. Хохлов А.В. Кривые длительной прочности, порождаемые линейной теорией вязкоупругости в сочетании с критериями разрушения, учитывающими историю деформирования // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75559>
18. Кутовой В.П., Шабанов А.П., Шакиртов М.М. Исследование напряженно деформированного состояния вершины усталостной трещины в головке рельса // Известия Транссиба. 2013. № 1 (13). С. 89-94.

19. Шабанов А.П. Возможная модель развития усталостной трещины в упрочняющихся материалах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 5. С. 40-47.
20. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов - М.: Металлургия, 1990. – 623 с.
21. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: – Киев, Наукова думка, 1987. – 175 с.
22. Головин С.А., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов. — М.: Металлургия, 1980. — 240 с.
23. Беляев Б.В., Голиков И.О., Добролюбов А.Н., Лебедев А.С. Математическая модель для диагностирования работоспособности летательных аппаратов при неисправностях в виде трещин // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118918>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-09](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-09)
24. Беляев Б.В., Лебедев А.С. Методика прогнозирования остаточного ресурса при разгерметизации летательных аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168167>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-08](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-08)

References

1. Barkova M.E. *Trudy MAI*, 2014, no. 75. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35927>
2. Broek D. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* (Fundamentals of Fracture Mechanics), Moscow, Vysshaya shkola, 1980, 368 p.

3. Romaniv O.N., Yarema S.Ya., Nikiforchin G.N. et al. *Ustalost' i tsiklicheskaya treshchinostoikost' konstruktsionnykh materialov: V. 4 Mekhanika razrusheniya I prochnost' materialov* (Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials: Vol. 4 Fracture mechanics and strength of materials), Kiev, Naukova dumka, 1990, 680 p.
4. Frolov E.S., Minaichev V.E. *Vakuumnaya tekhnika: Spravochnik* (Vacuum technology: Handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1985, 360 p.
5. Golubev A.I., Kondakov L.A. *Uplotneniya I uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik* (Seals and sealing equipment: Handbook) Moscow, Mashinostroenie, 1986, 464 p.
6. Panasyuk V.V. *Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov*. Panasyuk V.V. *Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov* (Mechanics of destruction and strength of aterials), Kiev, Naukova dumka, 1988-1990.
7. Panasyuk V.V., Andreikiv A.E., Kovchik S.E. *Metody otsenki treshchinostoikosti konstruktsionnykh materialov* (Methods for assessing the crack resistance of structural materials), Kiev, Naukova dumka, 1977, 277 p.
8. Troshchenko V.T., Pokrovskii V.V., Prokopenko A.V. *Treshchinostoikost' metallov pri tsiklicheskom nagruzhenii* (Crack resistance of metals under cyclic loading), Kiev, Naukova dumka, 1987, 256 p.
9. Kuznetsov E.B., Leonov S.S. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35927>
10. Endogur A.I., Kravtsov V.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 64. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=36558>

11. Golub V.P., Plashchinskaya A.V. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika*, 2003, no. 38, pp. 91-96.
12. Antunes F.V. Chegini F.G., Branco R., Camas D. A numerical study of plasticity induced crack closure under plane strain conditions, *International Journal of Fatigue*, 2015, no. 71, pp. 75-86. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.03.016>
13. Yates J.R., Zanganeh M., Tomlinson R.A., Brown M.W., Garrido F.A. Crack paths under mixed mode loading, *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, no. 75, pp. 319-330.
14. Shakirtov M.M., Shabanov A.P., Kornev V.M. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2013, vol. 54, no 2, pp. 163-170.
15. Shakirtov M.M. *Trudy MAI*, 2016, no. 89. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75559>
16. Shabanov A.P. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2005, vol. 46, no. 6, pp. 108-115.
17. Khokhlov A.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75559>
18. Kutovoi V.P., Shabanov A.P., Shakirtov M.M. *Izvestiya Transsiba*, 2013, no. 1 (13), pp. 89-94.
19. Shabanov A.P. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2010, no. 5, pp. 40-47.
20. Kotsan'da S. *Ustalostnoe rastreskivanie metallov* (Fatigue cracking of metals), Moscow, Metallurgiya, 1990, 623 p.

21. Troshchenko V.T., Sosnovskii L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov I splavov* (Fatigue resistance of metals and alloys), Kiev, Naukova dumka, 1987, 175 p.
22. Golovin C.A., Pushkar A. *Mikroplastichnost' i ustalost' metallov* (Microplasticity and fatigue of metals), Moscow, Metallurgiya, 1980, 240 p.
23. Belyaev B.V., Golikov I.O., Dobrolyubov A.N., Lebedev A.S. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118918>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-09](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-09)
24. Belyaev B.V., Lebedev A.S. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168167>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-08](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-08)

Статья поступила в редакцию 24.04.2024

Одобрена после рецензирования 05.05.2024

Принята к публикации 28.08.2024

The article was submitted on 24.04.2024.; approved after reviewing on 05.05.2024; accepted for publication on 28.08.2024