

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

Materials mechanics: strength, durability, safety

Начинаем публикацию статей, посвященных исследованиям процессов, механизмов, закономерностей и критериев разрушения. В продолжение ранее опубликованных материалов ведущие специалисты страны в области материаловедения, диагностики материалов, механических испытаний и инженерных расчетов будут представлять обобщенные и новые знания по указанным проблемам. Приглашаем читателей к участию в обсуждении теоретически значимых и практически важных вопросов научно-методического характера в данной области. Открываем подборку статьями Н. А. Махутова и Н. В. Туманова.

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-11-46-51

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ*

© **Николай Андреевич Махутов**

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия; e-mail: kei51@mail.ru

Статья поступила 8 августа 2018 г.

По материалам публикаций в журнале «Заводская лаборатория. Диагностика материалов» и основных монографических изданий представлены результаты проведения в XX – XXI вв. комплексных исследований многофакторных процессов, механизмов и критериев разрушения при вариации состояния дефектов типа трещин, условий нагружения и механических свойств конструкционных материалов. Трещиностойкость материалов и конструкций стала одной из ключевых проблем материаловедения, проектирования, изготовления и эксплуатации конструкций. Научной основой анализа трещиностойкости является механика разрушения, включающая оценку напряженно-деформированных и предельных состояний в вершине трещин. В качестве определяющих критериев этих состояний приняты коэффициенты интенсивности напряжений (линейная механика разрушения) и коэффициенты интенсивности деформаций (нелинейная механика разрушения). Приведены основные расчетные зависимости для построения диаграмм разрушения, связывающих рост трещин с условиями статического, циклического, длительного, динамического нагружения. Параметры расчетных зависимостей увязаны с особенностями процессов разрушения на нано-, микро-, мезо- и макроуровнях. Предложены направления дальнейших исследований трещиностойкости с освещением их результатов в журнале.

Ключевые слова: механика разрушения; прочность; живучесть; безопасность; трещина; трещиностойкость; рост трещин; разрушение; коэффициенты интенсивности напряжений и деформаций.

COMPLEX STUDY OF THE FRACTURE PROCESSES IN MATERIALS AND STRUCTURES

© **Nikolay A. Makhutov**

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: kei51@mail.ru

Submitted August 8, 2018.

The results of comprehensive studies of multifactor processes, mechanisms and criteria for fracture at a variation of the crack-like defect state, loading conditions and mechanical properties of structural materials carried out in the 20th – 21st centuries are presented on the basis of monographic publications and articles published in the journal “Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov.” Crack resistance of materials and structures has become a key problem of the material science, technology,

* Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 14-19-00776-П.

design, manufacture and service of structures. Fracture mechanics including estimation of the stress-strain and limiting states in a cracks tip formed a scientific basis of the crack resistance analysis. Stress intensity factors (linear fracture mechanics) and strain intensity factors (nonlinear fracture mechanics) are accepted as the basic criteria of those states. The basic computational relations for construction of the fracture diagrams which link the cracks growth with conditions of a static, cyclic, long-term, dynamic loading are presented. Parameters of computational relations are put into correspondence with the features of fracture processes on nano-, micro-, meso- and macrolevels. Prospects of the research and guidelines of further studying crack resistance are discussed.

Keywords: fracture mechanics; strength; survivability; safety; crack; crack resistance; growth of cracks; fracture; stress and strain intensity factors.

На страницах журнала «Заводская лаборатория. Диагностика материалов» с 60-х годов прошлого столетия продолжается обсуждение комплексных проблем механики циклического разрушения, материаловедения и структурного анализа металлов, физико-механических основ процессов повреждения и роста трещин на нано-, микро-, мезо- и макроуровнях. Это касается формирования математических и физических моделей процессов возникновения и развития трещин и трещиностойкости материалов. Такое обсуждение базируется на анализе результатов обширных отечественных и зарубежных экспериментальных и теоретических исследований фундаментальных закономерностей упругого и упругопластического деформирования в зонах возникновения и развития трещин циклического нагружения и кинетики накопления повреждений, ведущих к образованию исходных трещин в зонах максимальной поврежденности и их развитию в процессе статического и динамического нагружения.

Все эти вопросы нашли свое отражение в целом ряде заказных, обзорных и инициативных публикаций специалистов и членов редакционной коллегии журнала, начиная с 50 – 60-х годов XX в.: И. А. Биргера, А. М. Большакова, Л. Р. Ботвиной, Г. С. Васильченко, А. З. Воробьева, М. М. Гаденина, М. Н. Георгиева, А. Ф. Гетмана, В. М. Горицкого, М. А. Дауниса, Б. А. Дроздовского, А. Б. Злочевского, В. С. Ивановой, А. Г. Казанцева, В. П. Когаева, А. Я. Красовского, И. В. Кудрявцева, В. В. Ларионова, А. М. Лепихина, В. М. Маркочева, Ю. Г. Матвиенко, В. М. Матюнина, Н. А. Махутова, Е. М. Морозова, В. В. Москвичева, М. Д. Новопашина, И. А. Разумовского, С. И. Ратнер, А. Н. Романова, С. В. Серенсена, Л. А. Сосновского, М. Н. Степнова, В. Ф. Терентьева, Я. Б. Фридмана, А. А. Шанявского, Р. М. Шнейдеровича, Д. М. Шура.

Научной основой анализа стали результаты классических работ XIX – XX вв. по много- и малоцикловой усталости материалов (И. Баушингер, И. А. Биргер, В. Вейбулл, А. Велер, В. С. Иванова, Л. Коффин, Е. Лангер, С. Мэнсон,

А. Надаи, Г. Нейбер, И. А. Одинг, Г. С. Писаренко, С. В. Серенсен, В. Т. Трощенко), по линейной и нелинейной механике однократного (А. Гриффитс, Д. Дагдей, Д. Ирвин, Е. М. Морозов, Н. И. Мухелишвили, В. В. Новожилов, Е. Орован, В. В. Панасюк, В. З. Партон, Д. Райс, Д. Си, Г. П. Черепанов) и циклического (М. Клесниль, П. Пэрис, П. Ромвари, Ф. Эрдоган, С. Я. Ярема) разрушения. Обобщенные результаты выполненных комплексных исследований представлены в [1 – 15].

Исходные положения по анализу процессов разрушения. Актуальность экспериментальных исследований развития трещин в условиях многоцикловой усталости была продемонстрирована в 50 – 60-е годы XX в. работами В. Фрейденалля, С. В. Серенсена, Г. С. Писаренко, А. Ф. Селихова применительно к плоским образцам и панелям из авиационных сплавов. В них изучался циклический рост усталостных трещин l в зависимости от размеров начальных трещин l_0 , амплитуды номинальных циклических напряжений σ_{na} и числа циклов нагружения N с оценкой критической длины трещины l_c . По результатам экспериментов строились кривые роста трещин

$$l = F_l(l_0, N, \sigma_{na}) \leq l_c \quad (1)$$

и усталости

$$\sigma_{na} = F_\sigma\{N, l_0\}_c. \quad (2)$$

Выражения (1), (2) описывали конкретную кинетику роста трещин для данных материала, размеров объекта испытаний и начальной трещины, способа и режимов нагружения. Для практической реализации выражений (1) и (2) в оценках параметров живучести l , l_c по (1) и циклической прочности σ_{na} по (2) требовалось проведение большого числа опытов.

Основы механики однократного разрушения. Принципиально новым этапом в 60 – 70-е годы XX в. в анализе процессов циклического разрушения стало [1 – 3, 8 – 11] использование теоретических и экспериментальных основ линейной механики разрушения, ставшей класси-

ческой, позволившей с единых позиций описывать напряженное (σ_r) и деформированное (e_r) состояния в вершине трещин при однократном нагружении:

$$\{\sigma_r, e_r\} = F_K \{K_I / \sqrt{\pi r}, \theta\}, \quad (3)$$

где K_I — коэффициент интенсивности напряжений для модели (I) трещины нормального отрыва; r, θ — полярные координаты для анализируемой точки у вершины трещины.

Многочисленные аналитические, численные и экспериментальные решения краевых задач для большого числа практически важных случаев нагружения тел с трещинами позволили связать основные выражения (1) – (3) в формулу

$$K_I = \sigma_n \sqrt{\pi l_0} f_K \{K_I, K_{II}, K_{III}\} = \tau_n \sqrt{\pi l_0} f \{K_{II}, K_{III}\}, \quad (4)$$

где f — поправочные безразмерные функции, описывающие влияние способов (моделей I, II, III) нагружения; σ_n, τ_n — номинальные нормальные и касательные напряжения.

Условие статической трещиностойкости имело вид

$$\{K_I, K_{II}, K_{III}\} \leq \{K_{Ic}, K_{IIc}, K_{IIIc}\}, \quad (5)$$

где $K_{Ic}, K_{IIc}, K_{IIIc}$ — критические коэффициенты интенсивности напряжений соответственно для моделей нормального отрыва (I), продольного (II) и поперечного (III) сдвигов.

Величины $K_{Ic}, K_{IIc}, K_{IIIc}$ рассматривались как константы материала, получаемые по данным стандартных испытаний образцов с трещинами.

Механика циклического разрушения. На основе выражений (3) – (5) и обобщения многочисленных экспериментов П. Пэрисом и Ф. Эрдоганом была предложена универсальная степенная зависимость для скорости устойчивого роста трещин dl/dN при циклическом нагружении с размахом ΔK_I коэффициента интенсивности напряжений по мере роста трещины l (от ее начальной величины l_0) и увеличения размаха номинальных напряжений $\Delta \sigma_n$ и, следовательно, ΔK_I по (4):

$$dl/dN = C(\Delta K_I)^n, \quad (6)$$

где C, n — характеристики материала, определяемые экспериментально (в том числе по национальным и международным стандартам). Для металлических конструкционных материалов по данным экспериментов $2 \leq n \leq 4$. Характеристики C и n в (6) зависят от асимметрии цикла нагружения.

Степенное выражение (6) с учетом (4) по данным многочисленных экспериментов оказалось

справедливым для всех как отдельных (I, II, III), так и смешанных моделей трещин.

Для описания более общих закономерностей роста трещин циклического нагружения С. Я. Ярема предложил в развитие (6) уточняющее четырехпараметрическое выражение [1, 3]

$$\frac{dl}{dN} = \left(\frac{dl}{dN} \right)_0 \left(\frac{K_{\max} - K_{th}}{K_{jc} - K_{\max}} \right)^q, \quad (7)$$

где $K_{\max}$ — максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений в цикле; K_{th} — пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений, при котором не наблюдается рост трещин (неразвивающиеся трещины); K_{jc} — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, при котором происходит долом образца; $(dl/dN)_0$ — скорость роста трещины при $K_{\max} = K_0 = (K_{th} + K_{jc})/2$; q — показатель интенсивности роста трещин. Постоянные материала $(dl/dN)_0, K_{th}, K_{jc}$ и q определяются в эксперименте и зависят от асимметрии цикла нагружения.

Интегрирование выражений типа (6), (7) позволило расчетно-экспериментальным путем построить [1, 3, 6 – 8, 14, 15] кинетические кривые роста трещин $l(N)$ для заданных ΔK и $K_{\max}$, а с использованием (5) определить критический размер трещины l_c . Этот подход практически реализовал исходную значимость выражений (1), (2), когда $\sigma_{na} = \Delta \sigma_n/2$.

Механизмы разрушения. Для анализа стадии образования трещин и зон предразрушения r_n в вершине статических и циклических трещин была привлечена [3, 10, 11] теория дислокаций, порождавших нелинейные эффекты упругопластического деформирования в точках с координатами r, θ в выражении (3). Достижение критических состояний по (3) и (6) в этих зонах связывалось с предельной плотностью дислокаций, определяющей достижение максимальных разрушающих деформаций $e_r = e_c$ при $r = r_n$. В классических исследованиях Т. Якобори была принята степенная зависимость локальных пластических деформаций и плотности дислокаций, что в конечном счете обосновывало справедливость степенной зависимости (6) для скорости роста трещин.

В нашей стране и за рубежом в ведущих научных центрах были поставлены обширные и глубокие исследования по нано- и микромеханике разрушения, позволившие на двух начальных уровнях (нано и микро) связать скорость роста трещин dl/dN с параметрами кристаллической решетки и микроструктуры и объяснить причину бороздок (поцикловых актов продвижения трещин) в зоне их устойчивого развития по выраже-

нию (6), а также объяснить эффект неразвивающихся трещин при снижении σ_n и K_I до определенного уровня K_{th} .

Эти вопросы освещены в статье Н. В. Туманова, опубликованной ниже.

Исследования процессов деформирования и разрушения на мезоуровне были развиты в работах школы академика В. Е. Панина.

В отечественной и зарубежной литературе в последние годы XX в. появился теоретический и экспериментальный материал, позволивший уточнить и дополнить общую научную базу по процессам возникновения и развития трещин циклического нагружения.

В первую очередь это коснулось физических и физико-механических основ сопротивления трещинообразованию на базе атомного строения монокристаллических структур с дефектами атомных решеток. При этом параметры трещин l_0 и l_c увязывались с величинами межатомных расстояний d_a ($l_0 \geq 5 - 10d_a$), локальные напряжения в зонах трещин σ_r при $r \leq 0,3l_0$ принимались на уровне теоретической прочности σ_c , величина σ_c — на уровне 0,1 – 0,2 от модуля продольной упругости E . Сам процесс развития трещин связывался с таким увеличением расстояния d_a между атомами, при котором резко снижалось межатомное взаимодействие. Эти модели легли в основу классической наномеханики разрушения с введением в нее до 100 – 1000 взаимодействующих атомов. Здесь важную роль сыграли фундаментальные академические исследования А. Д. Третьякова, Н. Ф. Морозова, Р. В. Гольдштейна для нанодискретных структур.

Поскольку современные конструкционные материалы преимущественно на металлической и композиционной основах являются сложными микроструктурными образованиями, начали развиваться более сложные микромеханические модели образования и развития трещин (К. Миллер, Л. Г. Плювентаж, В. С. Иванова, О. Н. Романов, Л. Р. Ботвина, В. Ф. Терентьев, А. Н. Романов, А. А. Шанявский). В этом случае начальные дефекты l_0 в материалах связывались с размерами зерна d_3 (или их фрагментов), а критические напряжения σ_c в вершине трещины — с сопротивлением отрыву S_K . Это позволяло [2, 3, 10, 11] оценивать статическую K_{Ic} и циклическую трещиностойкость материалов K_{fc} на микроуровне по выражениям (3) – (6). Для мезозон в механике разрушения принимались величины, сопоставимые с размером $r_{II} \geq (10 - 20)d_3$. Критические напряжения σ_c в этих зонах могли находиться в пределах $\sigma_b \leq \sigma_c \leq S_K$, а пластические деформации сопровождались ротационными (сдвиговыми) механизмами.

Входящие в выражения (1) – (7) обобщенные закономерности разрушения (на основе рассмотренных выше выдающихся достижений в области нано-, микро-, мезомеханики деформирования и разрушения) стали использоваться в практических инженерных расчетах прочности, долговечности, живучести и трещиностойкости. Однако в отечественной и мировой нормативно-технической базе главными были и остаются расчеты в рамках макромеханики с использованием стандартных характеристик механических свойств (модуля упругости E , пределов текучести σ_T и прочности σ_B , относительного сужения при разрыве в шейке ψ_K), а в поверочных расчетах применяются указанные выше закономерности нано-, микро-, мезомеханики.

С учетом результатов большого числа исследований [1 – 15] по анализу конструкторских, технологических и эксплуатационных факторов, проведенных в ИМАШ РАН (С. В. Серенсен, Н. А. Махутов, Н. И. Пригоровский, А. Н. Романов), НИКИЭТ (В. М. Филатов, Е. Ю. Ривкин, Ю. Г. Драгунов, С. Е. Европин), ЦНИИ КМ (Г. П. Карзов, И. В. Горынин, Б. З. Марголин), ЦАГИ (Г. И. Нестеренко), ЦНИИТМАШ (А. Г. Казанцев), основные и уточненные поверочные расчеты было предложено осуществлять на основе решения ряда отдельных фундаментальных задач для соответствующих предельных состояний. В развитие указанных исследований начали использоваться [6, 7] единые деформационные критерии для механики статического, длительного, динамического, циклического разрушения, в частности:

унифицированные аналитические методы решения упругопластических краевых задач о концентрации напряжений в зонах изменения конструктивных форм и в зонах трещин;

деформационные критерии разрушения;

единая взаимоувязанная система запасов прочности, ресурса и живучести.

На этой основе для всех рассмотренных видов и механизмов разрушения определяющие характеристики (σ_a , K_{Ic} , ΔK_I , C , m , K_{fc} , K_{th} , q) уравнений (3) – (7) становятся расчетными. С их использованием исходными в основных и поверочных расчетах становятся: решения упругих краевых задач, степенные уравнения состояния (в истинных координатах), характеристики механических свойств при различных видах нагружения.

Результаты выполненных и новых исследований по изложенным выше комплексам проблем нано-, микро-, мезомеханики деформирования и разрушения будут предметом последующих специальных публикаций в журнале «Заводская лаборатория. Диагностика материалов».

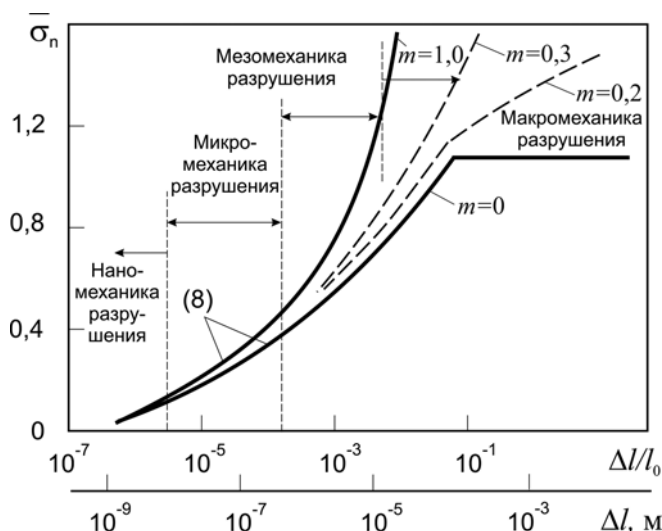


Рис. 1. Расчетные диаграммы статического нагружения

В общей постановке выражение для скорости роста трещин для полуцикла нагружения $k = 2N$ было получено в виде [6, 7]

$$\frac{dl}{dN} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{2(1+\mu)}{3} \frac{\bar{K}_{Ie}^{(k)}}{\bar{e}f} \right]^2 \times \frac{f^2\left(\frac{r}{l}\right)}{1 - \frac{1}{2\pi l_0} \left[\frac{2(1+\mu)}{3} \left(\frac{K_{Ie}^k}{\bar{e}j} \right)^2 \right]}, \quad (8)$$

где μ — коэффициент Пуассона ($0,3 \leq \mu \leq 0,5$); $\bar{K}_{Ie}$ — относительный коэффициент интенсивности деформаций;

$$\bar{e}_j = \frac{1}{e_T} \ln \frac{1}{1 - \psi_k} —$$

относительная истинная разрушающая деформация; $f(r/l)$ — поправочная функция к (3) для уточнения распределения деформаций в вершине трещины; l_0 — начальная длина трещины.

Коэффициент интенсивности деформаций $\bar{K}_{Ie}$ связан с относительным коэффициентом интенсивности напряжений по выражению $\bar{K}_I = \frac{\sigma_n}{\sigma_T} \sqrt{\pi l} f_{K_I}$ (4) и зависит от относительного

уровня напряжений $\bar{\sigma}_n = \sigma_n/\sigma_T$ и показателя упрочнения материала m в области упруго-пластических деформаций ($\bar{\sigma}_n = \bar{e}_n^m$; $\bar{\sigma}_n = e_n/e_T$):

$$\bar{K}_{Ie} = \bar{\sigma}_n^{(1-m)/m(1+m)} \bar{K}_I^{P_{ke}}. \quad (9)$$

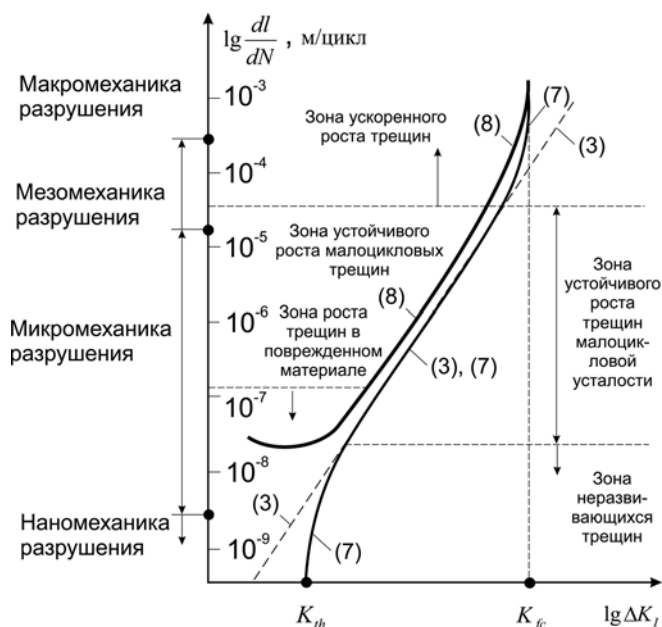


Рис. 2. Схема диаграмм развития трещин при циклическом нагружении

Здесь

$$P_{ke} = \frac{2 - 0,5(1-m)(1 - \bar{\sigma}_n)}{1 + m}$$

показатель связи $\bar{K}_I$ и $\bar{K}_{Ie}$; σ_T , e_T — напряжения и деформации предела текучести.

В упругой области $m = 1$, $P_{ke} = 1$, $\bar{K}_{Ie} = \bar{K}_I$ и выражение (8) сводится к (6) при $n = 2$. При упруго-пластических деформациях величина n рассчитывается, она возрастает с увеличением $\bar{\sigma}_n$ ($2 \leq n \leq 2P_{ke}$), $\bar{\sigma}_n \rightarrow \bar{\sigma}_v$ ($\bar{\sigma}_v$ — предел прочности).

При $N = 1$ (однократное статическое нагружение) выражение (8) позволяет получить диаграмму разрушения, связывающую l и $\bar{\sigma}_n$. При $0,8 \leq \bar{\sigma}_n \leq \bar{\sigma}_v$ по (8) можно построить диаграмму малоциклового разрушения, а при $0,5 \leq \bar{\sigma}_n \leq 0,8$ по (8), (7), (3) — диаграмму устойчивого роста трещин. При $0,3 \leq \bar{\sigma}_n \leq 0,5$ по (7) можно получить малоразвивающиеся или неразвивающиеся трещины.

Если начальные малые трещины l_0 циклического нагружения возникают в зонах предварительного повреждения, то по выражению (8) получают существенно более высокие скорости трещин, чем по (3) и (7). Это обстоятельство подтверждается экспериментами при циклическом нагружении образцов с концентраторами напряжений.

Изложенные выше особенности, механизмы и закономерности возникновения и развития трещин при статическом и циклическом нагружении позволяют построить расчетные диаграммы статического и циклического разрушения.

На рис. 1 показаны рассчитанные по (4) диаграммы статического разрушения, связывающие относительные номинальные напряжения $\bar{\sigma}_n = \sigma_n / \sigma_T$ и относительный рост усталостных трещин $\Delta l / l_0$ при $l_0 = 5$ мм при варьировании показателя упрочнения m .

На рис. 2 представлена схема диаграммы циклического нагружения, связывающая скорость роста трещин dl/dN с размахом коэффициента интенсивности напряжений при учете выражений (3), (7), (8).

Диаграммы разрушения (см. рис. 1 и 2) являются систематизированным представлением об обобщенных закономерностях, механизмах, критериях и параметрах сложных многоуровневых процессов разрушения в широком спектре механических свойств конструкционных материалов и условий нагружения.

Последующие публикации в журнале результатов исследований многофакторных процессов разрушения будут способствовать развитию сложных моделей разрушения, методических особенностей испытаний и их использованию при разработках конструкционных материалов, технологий и методов обоснования трещиностойкости объектов техносферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. — М.: МИБ СТС, 1995. Т. 1. — 360 с., 2001. Т. 2. — 254 с.
2. Прочность материалов и конструкций. В 3-х т. / Под общей ред. В. Т. Трошенко. — Киев: Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008 – 2010.
3. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие / Под ред. В. В. Панасюка. В 4-х т. — Киев: Наукова думка, 1988. — 488 с.
4. Серенсен С. В. Избранные труды. В 3-х т. — Киев: Наукова думка, 1985.
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. — М.: МГОФ «Знание». Т. 1 – 54, 1998 – 2018 гг.
6. Махутов Н. А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
7. Махутов Н. А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. — Новосибирск: Наука, 2017. — 724 с.
8. Морозов Е. М., Муиземнек А. Ю., Шадский А. С. Механика разрушения. — М.: Ленанд, 2016. — 459 с.
9. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. — М.: Физматлит, 2006. — 328 с.
10. Ботвина Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.
11. Шанявский А. А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. — Уфа: Уфим. полигр. комб., 2003. — 802 с.
12. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности. Сер. Диагностика безопасности. — М.: Издательский дом «Спектр», 2011. — 187 с.
13. Разумовский И. А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 240 с.
14. Махутов Н. А., Бурак М. И., Гаденин М. М. и др. Механика малоциклового разрушения. — М.: Наука, 1986. — 264 с.
15. Лепихин А. М., Махутов Н. А., Москвичев В. В., Черняев А. П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. — Новосибирск: Наука, 2003. — 174 с.

REFERENCES

1. Mechanics of disasters. Determination of crack resistance characteristics of structural materials. — Moscow: MIB STS, 1995. Vol. 1. — 360 p.; 2001. Vol. 2. — 254 p. [in Russian].
2. Strength of materials and structures. In 3 volumes / Edited by V. T. Troschenko. — Kiev: Institut problem prochnosti im. G. S. Pisarenko NAN Ukrainy, 2008 – 2010 [in Russian].
3. Fracture mechanics and strength of materials: the Handbook / Edited by V. V. Panasuk. In 4 volumes. — Kiev: Naukova dumka, 1988. — 488 p. [in Russian].
4. Serensen S. V. The selected transactions. In 3 volumes. — Kiev: Naukova dumka, 1985.
5. Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Engineering, technological and technogenic sphere safety. — Moscow: MGOF "Znanie". Vol. 1 – 54, 1998 – 2018 [in Russian].
6. Makhutov N. A. Strength and safety: fundamental and applied researches. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].
7. Makhutov N. A. Safety and risks: system researches and developments. — Novosibirsk: Nauka, 2017. — 724 p. [in Russian].
8. Morozov E. M., Muizemnek A. Yu., Shadsky A. S. Fracture mechanics. — Moscow: Lenizdat, 2016. — 459 p. [in Russian].
9. Matvienko Yu. G. Models and criteria of a fracture mechanics. — Moscow: Fizmatlit, 2006. — 328 p. [in Russian].
10. Botvina L. R. Fracture: kinetics, mechanisms, common regularities. — Moscow: Nauka, 2008. — 334 p. [in Russian].
11. Shanyavsky A. A. Safety fatigue fracture of elements of aviation structures parts. — Ufa: Ufim. poligr. komb., 2003. — 802 p. [in Russian].
12. Makhutov N. A., Gadenin M. M. Engineering diagnostics of the remaining resource and safety. The series "Safety Diagnostics". — Moscow: Izdatelskiy dom "Spektr", 2011. — 187 p.
13. Razumovsky I. A. Interference-optical methods of mechanics of a deformable rigid solid. — Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 2007. — 240 p. [in Russian].
14. Makhutov N. A., Burak M. I., Gadenin M. M., et al. Mechanics of low cycle fracture. — Moscow: Nauka, 1986. — 264 p. [in Russian].
15. Lepikhin A. M., Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Chernyaev A. P. Probability risk-analysis of structures of engineering systems. — Novosibirsk: Nauka, 2003. — 174 p. [in Russian].