

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-9-61-65>

ОБОБЩЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И СПЛОШНОСТИ ПРИ ОЦЕНКАХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОСТИ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ

© **Николай Андреевич Махутов**

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., 4; e-mail: kei51@mail.ru

Статья поступила 30 ноября 2018 г. Поступила после доработки 30 ноября 2018 г. Принята к публикации 6 марта 2019 г.

Рассмотрены общеметодические вопросы прочности и долговечности материалов и элементов конструкций при сочетании различных силовых, деформационных и температурных факторов. Многие десятилетия в отечественных и зарубежных лабораторных исследованиях на образцах сложилась ставшая традиционной методология получения исходных кривых длительной и циклической прочности, связывающих разрушающие напряжения со временем или числом циклов. На базе этих кривых с характерными участками и точками переломов, разделяющих области упругого и неупругого (пластических деформаций или деформаций ползучести) деформирования, проводят анализ длительных и циклических повреждений. С использованием простейшего линейного закона суммирования этих повреждений удается в первом приближении рассчитывать прочность и долговечность при изменяющихся режимах нагружения. Повышение требований к точности расчетов вызывает необходимость перехода от силовых критериев разрушения (в напряжениях σ) к деформационным (в упругих и неупругих деформациях ϵ). При этом появляется возможность построения и использования единого выражения для кривой длительного циклического разрушения (с учетом временного τ и циклического N факторов) и единого длительного циклического повреждения. При таком подходе можно сохранить линейный закон суммирования повреждений, хотя сами повреждения оцениваются как заведомо нелинейные. Статья ориентирована на продолжение обсуждения на страницах журнала наиболее сложных проблем комплексной оценки прочности, ресурса, живучести и безопасности высоко-рисковых объектов техники.

Ключевые слова: прочность; долговечность; повреждения; напряжения; деформация; сплошность материала.

THE GENERALIZED REGULARITIES OF DAMAGEABILITY AND INTEGRITY IN ESTIMATIONS OF THE ENDURANCE IN CONDITIONS OF VARIABILITY OF LOADING REGIMES

© **Nikolay A. Makhutov**

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Malyi Kharitonievskii per., 4, Moscow, 101990, Russia, e-mail: kei51@mail.ru

Received November 30, 2018. Revised November 30, 2018. Accepted March 6, 2019.

We consider and analyze general methodological issues regarding the strength and endurance (life-time) of the materials and structure elements under a combined effect of various force, deformation and temperature factors. The Journal "Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov" (Industrial laboratory. Diagnostics of materials) has launched systematic publications on this problematic since 2018. For many decades, domestic and foreign laboratory studies have gleaned to a traditional methodology for obtaining initial curves of the long-term and cyclic strength that related the breaking stresses with time or number of cycles. These curves, with the characteristic sections and break points, separating the areas of elastic and inelastic (plastic strain or creep strain) strain, are used in analysis of long-term and cyclic damage. Using the elementary linear law of damage summation, it is possible to calculate at a first approximation the strength and endurance under varying conditions of loading. Stepping up the requirements to the accuracy of calculations necessitates a transition from force fracture criteria (at stresses σ) to deformation criteria (in elastic and inelastic deformations ϵ). Thus, it becomes possible to construct and use a unified expression for the curve of the long-term cyclic fracture (taking into account the temporal τ and cyclic N factors) and a long-term cyclic damage. With such approach it is possible to remain the linear law of damage summation though those damages are obviously nonlinear. The goal of the study is to continue and

support the discussion of the most complex problems of a comprehensive assessment of the strength, resource, survivability and safety of high-risk engineering equipment within the journal pages.

Keywords: strength; life-time; endurance; damages; stresses; strain; integrity of a material.

Введение

В нашем журнале уже опубликован ряд статей по сложным вопросам расчетного и экспериментального [1] определения прочности (σ_K), долговечности (τ_K, N_K) и живучести (l_K) материалов и конструкций при различных сочетаниях сложных i -режимов нагружения — статистического σ , длительного $\sigma(t)$, циклического $N(t)$ с переменными напряжениями $\sigma_i(t)$ и деформациями $\varepsilon_i(t)$.

В статье [2] затронуты вопросы начального образования и последующего развития трещин циклического $l(N)$ и длительного $l(t, N)$ нагружения с привлечением микромеханики и механики циклического нагружения с учетом структурных особенностей материалов и возникающих «бороздок» по фронту растущих трещин.

В предыдущей (в данном номере журнала) статье В. И. Гладштейна и А. А. Любимова в анализ высокотемпературной долговечности $\tau_K(t)$ вводился показатель повреждаемости, оцениваемый по показателям сплошности $\psi(t)$ и суперсплошности $\Psi(t)$ материала.

Указанные выше факторы и параметры позволяют уточнить и усовершенствовать общие методы расчетно-экспериментального анализа закономерностей накопления повреждений $P(t)$ или циклической долговечности N_K [3].

Построение исходных кривых прочности и долговечности

В анализе прочности, повреждений и долговечности широко применяют известные уравнения и критерии кривых разрушения, предложенные К. Веллером, С. В. Серенсенем, Ю. Н. Работновым, Л. М. Качановым, Л. Коффином, С. Менсоном, А. Гриффитсом, П. Пэрисом.

Эти кривые традиционно связывали с зависимостями предельных (критических) номинальных напряжений по исходному опасному сечению $\sigma_{OK}(\tau_K)$ от времени нагружения τ_K или амплитуды напряжений $\sigma_{OK}(N_K)$ от числа циклов N_K до разрушения (рис. 1). По результатам стандартных испытаний гладких лабораторных образцов строят кривые длительного или циклического разрушения:

$$\sigma_{OK}(\tau_K) = F_o\{\tau_K, t\}; \quad \sigma_{OK}(N_K) = F_o\{N_K, t\}. \quad (1)$$

На этих кривых выделяют три характерные области:

СД, ГЦ — сверхдлительной (по времени $10^4 \leq \tau_K \leq 10^6$ ч) или гигацикловой ($10^7 \leq N_K \leq 10^{10}$) прочности;

КД, МЦ — кратковременной длительной ($10^{-2} \leq \tau_K \leq 10^2$ ч) или малоцикловой ($10^0 < N_K \leq 10^4$) прочности;

ПД, ПЦ — проектной длительной ($10^2 \leq \tau_K \leq 10^4$ ч) и циклической ($10^4 \leq N_K \leq 10^7$) прочности.

В инженерных и нормативных расчетах прочности на основе (1) величины напряжений $\sigma_{OK}(\tau_K)$ и $\sigma_{OK}(N_K)$ для областей (КД, МЦ), (ПД, ПЦ), (СД, ГЦ) в двойных логарифмических координатах представляются степенными функциями (кривые 1):

$$\{\sigma_{OK}(\tau_K), \sigma_{OK}(N_K)\} = \{C_\tau, C_N, \tau_K^{m_\tau}, N_K^{m_N}\}, \quad (2)$$

где C_τ, C_N, m_τ, m_N — константы конструкционного материала, определяемые экспериментально. Для области КД, МЦ

$$C_\tau = C_N = \sigma_B; \quad 0 \leq \{m_\tau, m_N\} \leq 0,05; \quad (3)$$

для области ПД, ПЦ

$$C_\tau \approx C_N \approx (0,5 - 0,8)\sigma_B; \quad 0,05 \leq \{m_\tau, m_N\} \leq 0,15; \quad (4)$$

для области СД, ГЦ

$$C_\tau = \sigma_{дл}, \quad C_N = \sigma_{-1}, \quad \{m_\tau, m_N\} = 0. \quad (5)$$

В области КД, МЦ начальное длительное и циклическое нагружение связано с образованием пластических деформаций, вызывающих уменьшение площади поперечного сечения ψ образца, устанавливаемое по кривой статического деформирования и определяющее рост истинных напряжений σ_n по сравнению с условными σ_o :

$$\sigma_n = \sigma_o/(1 - \psi). \quad (6)$$

Тогда при стандартном кратковременном однократном ($N_K = 1$) испытании

$$\sigma_{нк} = \sigma_B/(1 - \psi_K) = S_K, \quad (7)$$

где S_K — сопротивление разрыву в шейке ($S_K > \sigma_B$); ψ_K — относительное сужение в шейке ($0 \leq \psi_K \leq 0,7$).

Выражения (2), (3), (7) позволяют построить для участков КД, МЦ и ПД, ПЦ кривые разрушения 2 на рис. 1, для которых параметры $\{m_\tau, m_N\}$ возрастают от значений по (3) до значений по (4).

Это дает возможность переходить от раздельных расчетов по выражениям (3) и (4) к расчетам по выражению (2) в истинных напряжениях по (4) и (5) с одинаковыми параметрами C_τ, C_N, m_τ, m_N , исключив точку перегиба на границе

областей КД, МЦ и ПД, ПЦ. Но в этом случае сохраняется точка перегиба на границе ПД, ПЦ и СД, ГЦ с постоянными величинами $\sigma_{\text{дл}}$ и σ_{-1} по выражению (5).

Более общим и экспериментально подтверждаемым [3] является переход от силовой трактовки кривых 1 и 2 на рис. 1 по выражению (1) в напряжениях (силовой критерий) к их деформационной трактовке (кривая 3):

$$e_k(\tau) = F_e[\tau_k, t]; e_{ak}(N_k) = F_e[N_k, t]. \quad (8)$$

При этом истинную деформацию e_i представляют в виде двух составляющих (рис. 2):

$$e_i = e_{ie} + e_{ip}; e_i = \ln \frac{1}{1 - \psi}, \quad (9)$$

где e_{ie} и e_{ip} — истинные упругая и пластическая деформации.

Для всех областей (КД, МЦ; ПД, ПЦ; СД, ГЦ) приемлемыми оказываются (см. рис. 2) линейная в упругой области ($\sigma \leq \sigma_T$) и степенная в пластической области ($\sigma \geq \sigma_T$) аппроксимации диаграмм деформирования:

$$\sigma = eE \text{ при } \sigma \leq \sigma_T \text{ и } \sigma = \sigma_T(e/e_T)^m \text{ при } \sigma \geq \sigma_T. \quad (10)$$

На основе (8), (9) и по аналогии с (2) можно записать

$$e_{ик}(\tau_k) = e_{ике}(\tau_k)^{m_{\tau e}} + e_{икр}(\tau_k)^{m_{\tau p}}, \quad (11)$$

$$e_{ик}(N_k) = e_{ике}(N_k)^{m_{Ne}} + e_{икр}(N_k)^{m_{Np}}, \quad (12)$$

где $m_{\tau e}$, $m_{\tau p}$, m_{Ne} , m_{Np} — константы материала;

$$e_{ике} = S_k/E — \quad (13)$$

предельная упругая деформация при кратковременном однократном нагружении;

$$e_{икр} = \ln[1/(1 - \Psi_k)] — \quad (14)$$

предельная истинная пластическая деформация. При этом величины $m_{\tau p} > m_{\tau e} \geq m_{\tau}$; $m_{Np} > m_{Ne} > m_N$. Выражение (12) использовано в нормах расчета на циклическую прочность [4].

Если принять, что величины S_k и Ψ_k в выражениях (13) и (14) зависят от τ , то их введение в выражения (11) и (12) позволит вести расчет длительной циклической прочности [3]:

$$e_{ик}(\tau_k, N_k) = F_{\tau, N}\{\Psi_k(\tau_k), S_k(\tau_k), (m_{Ne}, m_{Np}, m_{\tau e}, m_{\tau p})\}. \quad (15)$$

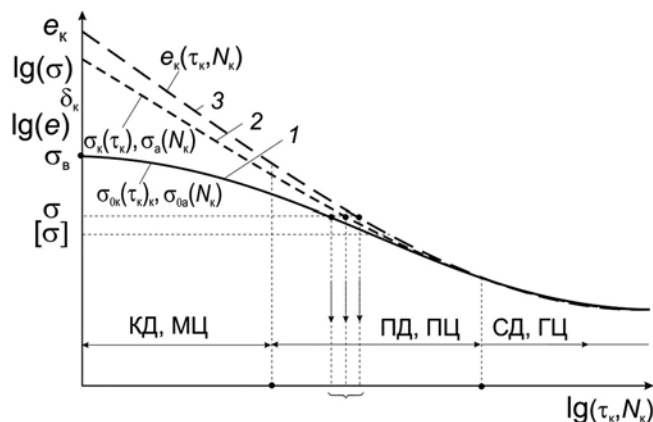


Рис. 1. Форма и параметры кривых длительной и циклической прочности и долговечности

Fig. 1. The shape and parameters for the curves of the long-term and cyclic strength and endurance

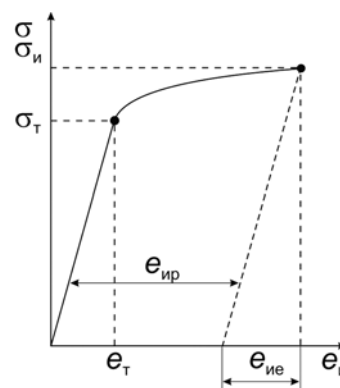


Рис. 2. Кривая статического (исходного) деформирования

Fig. 2. Static (initial) deformation curve

Выражения (12) и (15) дают возможность построить расчетные кривые прочности и долговечности (см. рис. 1): для N_k — в диапазоне от 10^0 до 10^{10} , для τ_k — в диапазоне от 10^{-2} до $3 \cdot 10^5$ ч.

Выражения (1) – (15) экспериментально подтверждены при длительных и циклических испытаниях по моменту образования на гладких образцах трещин протяженностью по поверхности 0,5 – 1 мм. При этом в случае циклического нагружения

$$N_o = K_T N_k^{m_T}, \quad (16)$$

где N_o — число циклов до образования трещины; N_k — число циклов до окончательного разрушения; K_T , m_T — константы материала. По данным [3] для конструкционных сталей $K_T \approx 0,51$ и $m_T = 1,04$. С увеличением N_o отношение N_o/N_k растет, т.е. доля живучести образца с трещиной сокращается от 0,5 до 0,04.

Анализ повреждаемости и сплошности

Приведенные выше результаты могут быть использованы для расчетной оценки повреждений d . В общем случае в расчет d вводят два типа повреждений — длительные статические и циклические:

$$d_\tau = \tau_i/\tau_K; \quad d_N = N_i/N_K. \quad (17)$$

Для температур $t < 0,25 - 0,30$ от температуры плавления $t_{пл}$ [4], когда отсутствуют выраженные эффекты ползучести и длительных повреждений ($d_\tau = 0$), основными оказываются циклические повреждения d_N . Для относительных температур $0,3 \leq t/t_{пл} < 0,7$ при небольшом числе циклов определяющим являются статические повреждения d_τ .

В инженерной практике для повышенных температур используют закон линейного суммирования повреждений:

$$d = d_\tau + d_N = 1. \quad (18)$$

Выражение (18) экспериментально подтверждено [3, 5] для случаев одночастотного и двухчастотного циклического нагружений при комнатной и высоких температурах, когда к повреждению d_{Nh} от основного низкочастотного процесса добавлялись повреждения d_{Nb} от высокочастотной составляющей:

$$d_h = d_{Nh} + d_{Nb}. \quad (19)$$

Эксперименты и практика эксплуатации конструкций при повышенных температурах и сложных спектрах нагружения показывают, что условие (18) при раздельной оценке d_τ и d_N по выражениям (2) – (5) не оправдывается ($0,2 \leq d \leq 1,3$).

Если повреждения d_τ и d_N определять уточненно с использованием выражений (6), (7), погрешности в оценках d сокращаются ($0,4 \leq d \leq 1,2$).

Существенное уточнение в оценках d достигается [3], когда за основу принимается выражение (15); при этом справедливость линейного суммирования повреждений повышается ($0,7 \leq d \leq 1,1$).

Если построить единую кривую длительной циклической прочности по выражениям (12) и (15), то можно ограничиться только расчетом d_N по (17). Но при этом фактор времени τ будет введен в расчет N_K по (12). Из этого следует, что простое по форме линейное суммирование повреждений (18) является существенно нелинейным в силу сложной (обычно степенной) связи между напряжениями σ_K и деформациями со временем

τ_K или числом циклов N_K по выражениям (2), (8), (11), (12), (15).

Дополнительно повысить точность определения длительной и циклической долговечности и повреждений можно путем введения еще одного вида повреждений d на структурно-механическом уровне, предложенного Л. М. Качановым, Ю. Н. Работновым [6, 7]. Это повреждение использовано в статье В. И. Гладштейна и А. А. Любимова.

В таком случае повреждения d_ω означают образование микротрещин $l(\tau)$ и нарушение сплошности материала ω , ведущих к дополнительному увеличению напряжений:

$$\sigma_\omega = \sigma_n/(1 - \omega), \quad (20)$$

где ω — потеря опасного сечения за счет несплошностей ω .

Выражение (20) справедливо для хрупких разрушений малопластичных материалов. Для пластичных конструкционных материалов роль ω сравнительно невелика. Вместе с тем, как показано в статье В. И. Гладштейна и А. А. Любимова, величину ω или ψ можно вводить для учета как начальных макродефектов (типа острых надразов), так и исходных технологических макродефектов, а также растущих при нагружении микротрещин. Но более апробированным в лабораторных исследованиях является использование уравнений и критериев линейной и нелинейной механики разрушения [1 – 4, 8].

Заключение

Дальнейшие комплексные исследования, методические и практические разработки в направлении обоснования прочности, долговечности, живучести и безопасности объектов атомной, тепловой энергетики, авиационной и ракетной техники [3, 9 – 11] с учетом сложных режимов термомеханического нагружения и процессов накопления длительных и циклических повреждений остаются актуальными и в дальнейшем будут находить отражение на страницах нашего журнала.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-08-00572_а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н. А. Комплексные исследования процессов разрушения материалов и конструкций / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 11. С. 46 – 51.
2. Туманов Н. В. Устойчивый рост усталостных трещин: микромеханизм и математическое моделирование / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 11. С. 52 – 69.

3. **Махутов Н. А.** Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
5. **Гаденин М. М.** Исследование влияния соотношения амплитуд деформаций при двухчастотном циклическом нагружении / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 12. С. 50 – 60.
6. **Качанов Л. М.** Основы механики разрушения. — М.: Наука, 1974. — 311 с.
7. **Работнов Ю. Н.** Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966. — 752 с.
8. **Махутов Н. А., Гаденин М. М., Неганов Д. А.** Риски и безопасность энергетического оборудования / Электрические станции. 2017. № 2. С. 2 – 9.
9. **Махутов Н. А., Гаденин М. М., Москвичев В. В. и др.** Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций. — Новосибирск: Наука, 2017. — 600 с.
10. **Махутов Н. А., Рачук В. С., Гаденин М. М. и др.** Прочность и ресурс ЖРД. Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей. — М.: Наука, 2011. — 525 с.
11. **Махутов Н. А., Рачук В. С., Гаденин М. М. и др.** Напряженно-деформированные состояния ЖРД. — М.: Наука, 2013. — 646 с.
2. **Tumanov N. V.** Stable growth of fatigue cracks: micromechanism and mathematical modelling / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2018. Vol. 84. N 11. P. 52 – 69 [in Russian].
3. **Makhutov N. A.** Strength and safety: fundamental and applied researches. — Nivosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].
4. Strength calculation norms for equipment and pipelines of nuclear engine installations. — Moscow: Énergoatomizdat, 1989. — 525 p. [in Russian].
5. **Gadenin M. M.** Research of amplitudes strains ratio effect at two-frequency cyclic loading / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2018. Vol. 84. N 12. P. 50 – 60.
6. **Kachanov L. M.** Fracture mechanics bases. — Moscow: Nauka, 1974. — 311 p. [in Russian].
7. **Rabotnov Yu. N.** Creep of structures parts. — Moscow: Nauka, 1966. — 752 p. [in Russian].
8. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Neganov D. A.** Risks and safety of a power-generating equipment / Élektr. Stantsii. 2017. N 2. P. 2 – 9 [in Russian].
9. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Moskvichov V. V., et al.** Local criteria of strength, resource and survivability of aviation structures. — Nivosibirsk: Nauka, 2017. — 600 p. [in Russian].
10. **Makhutov N. A., Rachuk V. S., Gadenin M. M., et al.** Strength and resource of liquid-fuel rocket engines. — Moscow: Nauka, 2011. — 525 p. [in Russian].
11. **Makhutov N. A., Rachuk V. S., Gadenin M. M., et al.** Stress-strain states of liquid-fuel rocket engines. — Moscow: Nauka, 2013. — 646 p. [in Russian].

REFERENCES