

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-10-47-54>**УНИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТОВ И ИСПЫТАНИЙ
НА ПРОЧНОСТЬ, РЕСУРС И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ**© **Николай Андреевич Махутов, Михаил Матвеевич Гаденин***Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук. Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; *e-mail: safety@imash.ru*Статья поступила 31 мая 2019 г. Поступила после доработки 31 мая 2019 г.
Принята к публикации 27 июня 2019 г.*

Показано, что для всех объектов машиностроительного комплекса решение проблем прочности, ресурса и трещиностойкости в значительной степени сводится к научно обоснованному определению допустимых расчетных параметров ресурса и удержанию уровней напряжений и деформаций несущих элементов рассматриваемых объектов в допускаемых пределах. Это требование распространяется на основные эксплуатационные расчетные параметры — долговечность по числу циклов и времени, размер дефектов, температуру, скорость деформирования. Соответствующие указанным случаям уравнения состояния, подкрепленные необходимой расчетно-экспериментальной информацией, дают возможность оценить условия достижения предельных состояний рассматриваемых объектов по величинам запасов. На базе описанного подхода рассматривают традиционные методы проектирования, изготовления и эксплуатации оборудования, основанные на детерминированных критериях статической, длительной, циклической, динамической, температурной прочности, на стандартных характеристиках механических свойств конструкционных материалов, анализе номинальных и предельных напряженных состояний несущих конструкций и введении запасов по напряжениям, деформациям и ресурсу. Подчеркнута необходимость перехода в расчетах прочности, ресурса и трещиностойкости к обобщенному анализу критериев разрушения на базе многофакторных расчетных и экспериментальных методов определения запасов. Согласно изложенному, решение фундаментальных задач анализа и обеспечения штатной и нештатной эксплуатации объектов техносферы по предлагаемым подходам базируется на их прямой количественной связи с результатами решения задач построения уравнений состояния, решения краевых задач и формулировки критериев предельных состояний с оценкой запасов прочности, ресурса и трещиностойкости. При этом на базе характеристик механических свойств материалов, входящих в оценки напряженно-деформированных и предельных состояний, строится комплексная и взаимоувязанная система кривых деформирования и кривых разрушения. В качестве основных анализируются линейные (упругие) и нелинейные (упругопластические) подходы для построения расчетных кинетических зависимостей, характеризующих в общем случае процессы образования и развития зон повреждений и разрушений, которые и обуславливают изменение запасов.

Ключевые слова: прочность; ресурс; трещиностойкость; механические свойства материалов; объекты техносферы; уравнения состояния; напряжения; деформации; дефекты; разрушение.

**UNIFICATION OF THE CALCULATION METHODS AND TESTS
FOR STRENGTH, LIFE TIME AND CRACK RESISTANCE**© **Nikolay A. Makhutov, Mikhail M. Gadenin***Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4, Maly Kharitonievsky per., Moscow, 101990, Russia, *e-mail: safety@imash.ru*Received May 31, 2019. Revised May 31, 2019. Accepted June 27, 2019.*

It is showed that for all facilities of the machine-building engineering complex the solution of the problems of strength, life time and crack resistance is confined to scientifically grounded determination of the admissible design parameters of the life time and keeping the levels of stresses and deformations of the bear-

ing elements of the objects in question within the permissible limits. This requirement is extended to the basic operational design parameters — durability in cycling and time, size of the flaws, temperature, and deformation rate. Then the equations of state corresponding to the indicated cases, supported by the necessary computational and experimental information, provide a possibility to assess the conditions for attaining the limiting states of the objects under consideration by the values of corresponding margins. The developed approach is used in analysis of traditional methods of design, manufacture and the operation of the equipment which are based on determinate criteria of static, long-term, cyclic, dynamic, and temperature strength, as well as on the standard characteristics of the mechanical properties of structural materials, analysis of the rated and limiting stress states of bearing structures with allowance for the margin values of stresses, strains and life time. An emphasis is made on the necessity of going to the generalized analysis of the fracture criteria on the basis of multifactor computational and experimental methods of margin determination when calculating strength, life time and crack resistance. According to the considered approach it is stated that the general formulation and solution of fundamental problems of analysis and provision of nominal and abnormal operation of technogenic objects is based on their straight quantitative connection with the problems of constructing equations of state, solving the boundary value problems and formulating the criteria of limiting states along with assessment of the margins of strength, life time and crack resistance. A complex and mutually consistent system of deformation and fracture curves is constructed proceeding from the characteristics of the mechanical properties of materials inherent to the estimates of the stress-strain and limiting states. Linear (elastic) and nonlinear (elasto-plastic) approaches to construction of kinetic equations characterizing in general the processes of nucleation and development of damage and fracture zones which are responsible for margin reduction are considered and analyzed as most important ones.

Keywords: strength; life time; crack resistance; mechanical properties of materials; technogenic objects; state equation; stress; strain; flaws; fracture.

Введение

Для всех объектов машиностроительного комплекса решение проблем прочности, ресурса и безопасности эксплуатации в их развитии [1, 2] в значительной степени сводится к научно обоснованному определению допустимых расчетных параметров ресурса и удержанию уровней напряжений σ и деформаций e [2 – 4] рассматриваемых объектов в допускаемых пределах:

$$\sigma \leq [\sigma], \quad e \leq [e], \quad (1)$$

где величины $[\sigma]$ и $[e]$ определяют как их разрушающие значения σ_K и e_K , уменьшенные на соответствующие запасы n :

$$[\sigma] = \sigma_K/n_\sigma, \quad [e] = e_K/n_e. \quad (2)$$

Это требование распространяется на основные эксплуатационные расчетные параметры — долговечность по числу циклов N и времени τ , коэффициент интенсивности K_I с учетом размера трещин (дефектов) l , температуру t , устойчивость λ :

$$N \leq [N]; \quad \tau \leq [\tau]; \quad l \leq [l], \quad t \leq [t] \quad (\text{или } t \geq [t]); \\ \lambda \leq [\lambda]; \quad K_I \leq [K_I], \quad (3)$$

где при использовании соответствующих значений запасов по каждому из этих параметров

$$[N] = N_K/n_N, \quad [\tau] = \tau_K/n_\tau, \\ [K_I] = K_{I_K}/n_{K_I}, \quad [\lambda] = \lambda_K/n_\lambda. \quad (4)$$

В выражениях (1) – (4) основными являются характеристики прочности σ , пластичности e , устойчивости λ , ресурса N , τ и трещиностойкости l и K_I . При расчетах по этим выражениям решают три унифицированные задачи:

строят уравнения состояния (диаграммы деформирования), связывающие напряжения σ и деформации e в упругой и неупругой областях;

решают линейные и нелинейные краевые задачи о напряженно-деформированных состояниях в зонах неоднородного распределения σ и e ;

обосновывают и выбирают критерии достижения предельных состояний — недопустимых (критических) пластических деформаций e_K и напряжений σ_K при потере устойчивости и разрушении.

Если принять, что все расчетные параметры в выражениях (1) – (4) имеют вероятностную природу, то это означает, что наступление повреждений, отказов, аварий и катастроф также имеет вероятностный характер [2, 5]. Тогда выражения (1) – (4), подкрепленные необходимой статистической информацией, дают возможность оценить надежность объектов техносферы, что, в свою очередь, означает обеспечение заданного запаса n по установленной вероятности P . На основе выражений (1) и (2) для напряжений и деформаций можно записать

$$n_{\sigma P} = (\sigma_K)_P/(\sigma)_P, \quad n_{eP} = (e_K)_P/(e)_P. \quad (5)$$

Аналогично оценивают вероятностные характеристики по другим запасам, входящим в выражения (2) и (4).

В более строгой постановке имитационное вероятностное моделирование условий эксплуатационного нагружения и реакций (повреждений, отказов, аварий и катастроф) на эти условия несущих конструкций позволяет определить величины P путем интегрирования функций плотности вероятности (по объему элементов, циклам N , времени t , размерам дефектов l , температурам t) для тех локальных зон, в которых локальные напряжения и деформации превосходят критические.

Невыполнение запасов по выражениям (1) – (4) с вероятностью P приводит к увеличению ущербов (затрат) U , связанных с возникновением и минимизацией последствий повреждений, отказов, аварий и катастроф [2 – 6]. Эти ущербы также являются статистически варьируемыми величинами. На этой основе оценка рисков R может быть выполнена путем суммирования соответствующих функциональных зависимостей параметров P_i и U_i для каждого i -го опасного процесса и состояния:

$$R = \sum_i F_{Ri}(P_i, U_i). \quad (6)$$

До настоящего времени задачи прочности, ресурса и безопасности рассматривали в основном как отдельные и самостоятельные, а соответствующие расчетные закономерности для предельных и допускаемых состояний определяли обычно не связанными между собой выражениями (1) – (6). В то же время предпринимали попытки построения единой системы расчетных уравнений, единых критериев и взаимоувязанных запасов. При этом в основу таких подходов были положены деформационные критерии прочности, ресурса и живучести [2, 3]. Это позволило с единых позиций описать:

кратковременные статические разрушения, рассматриваемые при анализе статической прочности;

циклические (мало- и многоцикловые) разрушения, рассматриваемые при анализе циклического ресурса;

длительные статические разрушения, рассматриваемые при анализе временного ресурса;

длительные циклические разрушения, рассматриваемые при анализе циклического ресурса во временной постановке;

динамические процессы разрушения, рассматриваемые при анализе динамической прочности и секундного по времени ресурса;

вязкие, квазихрупкие и хрупкие разрушения, рассматриваемые при анализе кратковременной живучести по критериям трещиностойкости линейной и нелинейной механики разрушения;

циклический рост трещин, рассматриваемый при анализе циклической живучести по критери-

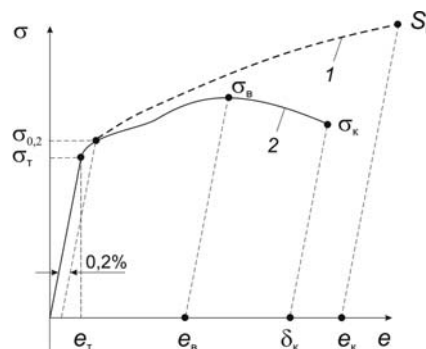


Рис. 1. Обобщенная диаграмма деформирования в истинных (1) и условных (2) координатах

Fig. 1. The generalized deformation diagram plotted in the true (1) and conditional (2) coordinates

ям трещиностойкости линейной и нелинейной механики разрушения.

Результаты большого числа выполненных расчетов и испытаний лабораторных образцов, моделей и натурных конструкций подтверждают возможность такого подхода.

Построение уравнений состояния

При решении общих проблем прочности, ресурса и трещиностойкости наибольшую значимость приобретают диаграммы деформирования (рис. 1), получаемые при стандартных кратковременных механических испытаниях. По ним определяют базовые характеристики механических свойств материалов, входящие во все указанные выше расчеты — модуль упругости E ; предел текучести σ_T (или условный предел текучести $\sigma_{0,2}$); сопротивление разрыву в шейке S_K ; предельную пластическую деформацию при разрыве в шейке (относительное сужение) ψ_K [2, 7]. По указанным характеристикам или непосредственно по экспериментальным данным определяют другие важные расчетные параметры — предел прочности (кратковременное сопротивление разрушению) σ_B ; показатель упрочнения m в упругопластической области; предельную равномерную пластическую деформацию e_B .

В случае выполнения комплексного анализа прочности и ресурса кривую деформирования в истинных координатах (истинных напряжениях и истинных деформациях) записывают в форме

$$\sigma = \sigma_T (e/e_T)^m, \quad (7)$$

$$m = \frac{\lg(S_K/\sigma_T)}{\lg(e_K/e_T)}. \quad (8)$$

В области упругих деформаций показатель (модуль) упрочнения $m = 1$, $E = e_T/\sigma_T$; при упругопластическом деформировании $0 \leq m \leq 1$. Для конструкционных металлов показатель m пони-

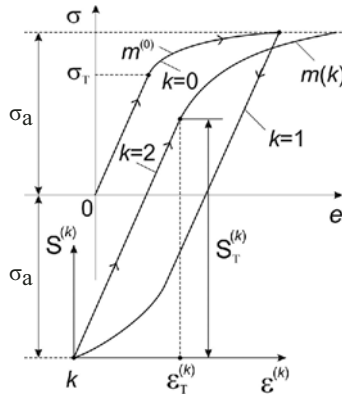


Рис. 2. Обобщенная диаграмма циклического деформирования

Fig. 2. The generalized diagram of cyclic deformation

жается по мере увеличения σ_T и роста отношения σ_T/σ_B [2]. Тогда для расчетов статической прочности на основе (1) используют выражение

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{\sigma_B}{n_B}, \frac{\sigma_T}{n_T}, \frac{S_K}{n_S} \right\}, \quad (9)$$

а для расчетов статической жесткости — аналогичное выражение

$$[e] = \min \left\{ \frac{e_T}{n_T}, \frac{e_B}{n_{eB}}, \frac{e_K}{n_{eK}} \right\}, \quad (10)$$

где $e_K = \ln \frac{100}{100 - \psi_K}$ — истинная деформация при

статическом разрушении. Если жесткость определяется в пределах упругости, то $n_T = n_{eT}$; если за пределами упругости, то $n_T \leq n_{eT} \leq n_{eB} \leq n_{eK}$.

Для оценки устойчивости используют известные уравнения Эйлера – Ясинского

$$\sigma_y \leq [\sigma]_y \leq \frac{\sigma_K}{n_y} = \frac{1}{n_y} \frac{\pi^2 E}{\mu \lambda^2}, \quad (11)$$

где σ_K — критическое напряжение при потере устойчивости; λ — гибкость стержня; n_y — запас по устойчивости; μ — коэффициент Пуассона.

Таким образом, расчеты прочности, жесткости и устойчивости проводят с использованием таких базовых характеристик механических свойств материала, как E , σ_T , σ_B , ψ_K , по которым определяют величины параметров e_K , m , S_K [2 – 7].

При циклическом (малоцикловом — $10^0 \leq N \leq 10^5$ и многоцикловом — $10^5 \leq N \leq 10^{10}$) нагружении обобщенные кривые деформирования получают при двух основных режимах нагружения:

мягком — с постоянными амплитудами напряжений ($\sigma_a = \text{const}$);

жестком — с постоянными амплитудами деформаций ($e_a = \text{const}$).

В экспериментах эти обобщенные диаграммы строят для заданного числа полуциклов нагружения ($k = 2N$). Исходному нагружению ($k = 0$) соответствуют характеристики $\sigma^{(0)}$, $e^{(0)}$, $m^{(0)}$, σ_T (рис. 2).

Нагружению в любом из последующих полуциклов k с началом отсчета координат диаграммы деформирования в точке k по принципу Мазинга соответствует

$$S_T^{(k)} \approx 2\sigma_T = S_T, \quad (12)$$

тогда размах напряжений $S^{(k)}$ в k -м полуцикле составит

$$S^{(k)} \approx S_T (e^{(k)}/e_T)^{m(k)}, \quad (13)$$

а показатель циклического упрочнения

$$m(k) = F\{\sigma^{(0)}, e^{(0)}, m^{(0)}, k\}, \quad (14)$$

где $m(k)$, $S^{(k)}$, $e^{(k)}$ — характеристики диаграммы циклического упругопластического деформирования в k -м полуцикле; $\sigma^{(0)}$, $e^{(0)}$ — напряжения и деформации в исходном (нулевом, $k = 0$) полуцикле нагружения.

Для циклически разупрочняющихся материалов с ростом числа полуциклов k величина $m(k)$ уменьшается, для циклически упрочняющихся — увеличивается, а для циклически стабильных — не изменяется и составляет $m(k) = m(1)$.

Как и при статическом однократном нагружении, сопротивление циклическому нагружению определяется через характеристики механических свойств материала E^t , ψ_K^t , S_K^t в этих условиях (при температуре t) с учетом отношения σ_T^t/σ_B^t . При длительном высокотемпературном нагружении базовыми являются кривые длительной прочности $\sigma_{B\tau}^t$ и пластичности $\psi_{K\tau}^t$ для времени τ :

$$\sigma_{B\tau}^t = \sigma_B^t (\sigma_0/\sigma)^{m_B}, \quad \psi_{K\tau}^t = \psi_K^t (\tau_0/\tau)^{m_\psi}, \quad (15)$$

где τ_0 — время кратковременных испытаний ($\tau_0 \approx 0,05$ ч); m_B , m_ψ — характеристики материала, зависящие от температуры t и предела текучести σ_T^t .

Когда потенциально опасные объекты подвергаются циклическому нагружению в области высоких температур, на основе экспериментальных данных строят кривые длительной циклической прочности в координатах амплитуда условных упругих напряжений $\sigma_{a\tau}^* = e_a E^t$ (e_a — амплитуда упругопластических деформаций) — число циклов нагружения N_τ в этих условиях, варьируя при этом время выдержки в цикле $\tau_{ц}$. При отсутствии возможностей проведения таких экспери-

ментов строят расчетные кривые $\sigma_{a\tau}^* - N_\tau$, а длительность деформирования определяют как

$$\tau = \tau_{\text{ц}} N_\tau. \quad (16)$$

Подставляя (16) в (15), можно получить выражения для определения характеристик $\sigma_{\text{в}\tau}^t$ и $\psi_{\text{к}\tau}^t$ применительно к семейству кривых $\sigma_{a\tau}^* - N_\tau$ по параметру $\tau_{\text{ц}}$. В них в качестве базовых используют характеристики механических свойств E^t , $\sigma_{\text{т}}^t$, $\sigma_{\text{в}}^t$, $\phi_{\text{к}}^t$, а в качестве расчетных параметров — $e_{\text{к}\tau}^t$, $\sigma_{0,2}^t / \sigma_{\text{в}}^t$.

При оценках влияния эффекта температур t , отличающихся от комнатной $t_0 = 20^\circ\text{C}$ (в областях низких климатических $20^\circ\text{C} \geq t \geq -60^\circ\text{C}$, криогенных $-60^\circ\text{C} \geq t \geq -270^\circ\text{C}$, повышенных $20^\circ\text{C} \leq t \leq 350^\circ\text{C}$ и высоких $350^\circ\text{C} \leq t \leq 1000^\circ\text{C}$), стандартные испытания проводят в термокриокамерах. При отсутствии данных о результатах таких испытаний строят расчетные зависимости изменения механических свойств от температур t , $^\circ\text{C}$ или T , K ($T = t + 273$):

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{т}}^t &= \sigma_{\text{т}} \exp \left[\beta_{\text{т}} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \\ \sigma_{\text{в}}^t &= \sigma_{\text{в}} \exp \left[\beta_{\text{в}} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \end{aligned} \quad (17)$$

где $\beta_{\text{т}}$ и $\beta_{\text{в}}$ — расчетные характеристики материала, зависящие от $\sigma_{\text{т}}$; $T_0 = 293 \text{ K}$.

Предельные пластические деформации $\psi_{\text{к}}^t$ при температуре t определяют расчетом через величины $\psi_{\text{к}}$, $\sigma_{\text{т}}$ и $\sigma_{\text{в}}$ при комнатной температуре.

Для динамически нагруженных конструкций при повышенных скоростях деформирования $\dot{\epsilon} = d\epsilon/d\tau$ ($10^0 \text{ c}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^3 \text{ c}^{-1}$) имеет место увеличение пределов текучести и прочности, определяемое экспериментально или расчетом по степенным выражениям

$$\sigma_{\text{т}}^{\dot{\epsilon}} = \sigma_{\text{т}} (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^{m_{\dot{\epsilon}_{\text{т}}}}, \quad \sigma_{\text{в}}^{\dot{\epsilon}} = \sigma_{\text{в}} (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^{m_{\dot{\epsilon}_{\text{в}}}}, \quad (18)$$

где $m_{\dot{\epsilon}_{\text{т}}}$, $m_{\dot{\epsilon}_{\text{в}}}$ — показатели чувствительности материала к скорости деформирования, зависящие от $\sigma_{\text{т}}$ и $\sigma_{\text{в}}$.

Характеристики динамической пластичности рассчитывают через $\psi_{\text{к}}$, $\sigma_{\text{т}}$ и $\sigma_{\text{в}}$ по соотношениям, подобным использующимся для описания температурных эффектов. Выражения (15), (17) и (18) позволяют определить показатель упрочнения m в выражениях (8), (13) и (14).

Систему базовых экспериментально определяемых (E , $\sigma_{\text{т}}$, $\sigma_{\text{в}}$, $\psi_{\text{к}}$) и расчетных (m , $S_{\text{к}}$, m_p , m_e , $m_{\text{в}}$, m_{ψ} , $\beta_{\text{т}}$, $\beta_{\text{в}}$, $n_{\text{в}}^e$, $n_{\text{т}}^e$) характеристик материалов устанавливают по результатам механических испытаний гладких стандартных образцов.

Анализ напряженно-деформированных состояний

Обобщенная диаграмма однократного деформирования (см. рис. 1) в форме выражений (7), (8) справедлива для случаев:

длительного нагружения по выражениям (15) в виде изохронных кривых деформирования при описании процессов ползучести и релаксации;

однократного нагружения при варьируемых температурах T по выражению (17);

динамического нагружения с переменными скоростями деформирования по выражению (18).

Для экспериментальной оценки влияния размеров поперечных сечений F на механические свойства проведены [2] уникальные испытания серии образцов с варьированием величины F на пять порядков (от $3 - 4$ до $4 \cdot 10^5 \text{ мм}^2$). Обобщение результатов этих испытаний при разрушающих усилиях от $2 \cdot 10^3$ до $8 \cdot 10^7 \text{ Н}$ позволило сформулировать систему расчетных степенных уравнений, описывающих изменение базовых характеристик материала при варьировании F :

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{т}}^F &= \sigma_{\text{т}} (F_0 / F)^{m_{\text{т}F}}, \quad \sigma_{\text{в}}^F = \sigma_{\text{в}} (F_0 / F)^{m_{\text{в}F}}, \\ \psi_{\text{к}}^F &= \sigma_{\text{к}} (F_0 / F)^{m_{\psi F}}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $m_{\text{т}F}$, $m_{\text{в}F}$, $m_{\psi F}$ — параметры характеристик свойств материалов для групп сталей по уровню их прочности и степени легирования (в общем случае можно принять $m_{\text{т}F} \approx m_{\text{в}F} = 0,013$, $m_{\psi F} = 0,024 - 0,04$).

Для получения зависимостей базовых характеристик механических свойств от вида напряженного состояния с компонентами главных напряжений $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ проводят серии испытаний плоских или цилиндрических образцов ($\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) на одноосное растяжение, трубчатых образцов — на кручение ($\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -|\sigma_1|$), трубчатых образцов с внутренним давлением ($\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 \neq 0$, $\sigma_3 \approx 0$) или образцов с концентрацией напряжений ($\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 \neq 0$, $\sigma_3 \neq 0$) — для анализа трехосного напряженного состояния. При отсутствии соответствующих экспериментальных данных объемность напряженного состояния учитывают через коэффициент повышения сопротивления образованию пластических деформаций

$$I_{\sigma} = \sigma_1 \sqrt{\frac{2}{(1 - \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_3)^2 + (\bar{\sigma}_3 - 1)^2}} \quad (20)$$

или через коэффициент снижения предельной пластичности

$$D_e = \frac{1}{I_{\sigma} (1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)}, \quad (21)$$

где $\bar{\sigma}_2 = \sigma_2 / \sigma_1$, $\bar{\sigma}_3 = \sigma_3 / \sigma_1$ — относительные главные напряжения.

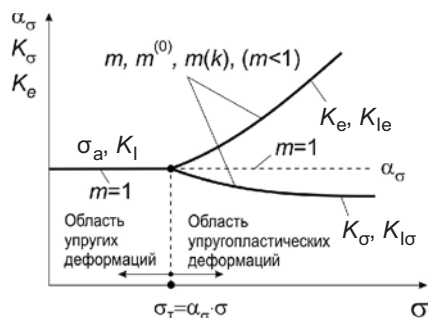


Рис. 3. Схема деформирования в зонах концентрации (α_σ) и трещин (K_I) в линейной и нелинейной постановках

Fig. 3. The scheme of deformation in the zones of concentration (α_σ) and cracks (K_I) (linear and nonlinear scenario)

Кривая, подобная приведенной на рис. 1, может быть использована при построении диаграмм деформирования по результатам испытаний образцов с варьированием размеров сечения F по выражениям (19), а также образцов с изменением объемности напряженного состояния ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) — по выражениям (20), (21).

Реальные несущие элементы конструкций и оборудования, как правило, содержат различные зоны концентрации и имеют разномасштабные размеры поперечных сечений. Проведение механических испытаний для оценки чувствительности к фактору концентрации напряжений (в упругой и неупругой областях) и к масштабному фактору представляет существенные методические сложности. Для большой группы конструкционных металлических материалов с использованием модифицированных аналитических решений получена [2] функциональная связь f_K коэффициентов концентрации напряжений K_σ и деформаций K_ϵ в упругопластической области с теоретическими коэффициентами концентрации α_σ в упругой области с учетом относительного уровня действующих напряжений σ/σ_T и показателя упрочнения m :

$$\{K_\sigma, K_\epsilon\} = f_K\{\alpha_\sigma, \sigma/\sigma_T, m\}, \quad (22)$$

$$\sigma_{\max K} = \sigma K_\sigma, \quad e_{\max K} = e K_\epsilon. \quad (23)$$

На рис. 3 показано изменение коэффициентов концентрации $\alpha_\sigma, K_\sigma, K_\epsilon$ по выражению (22) для областей упругих ($m = 1, \alpha_\sigma = K_\sigma = K_\epsilon$) и упругопластических ($m < 1, K_\sigma \leq \alpha_\sigma, K_\epsilon \geq \alpha_\sigma$) деформаций, разделяемых условием $\alpha_\sigma \sigma = \sigma_T$. Зависимость (22) справедлива для случаев однократного ($m = m^{(0)}$), циклического ($m = m(k)$), длительного ($m = m(\tau)$) и динамического ($m = m(\dot{e})$) нагружений.

Экспериментально величины $\alpha_\sigma, K_\sigma, K_\epsilon$ определяют методами тензометрии, фотоупругости, голографии и др.; их теоретические значения — аналитическими методами теорий упругости,

пластичности, ползучести и численными методами (конечных элементов, конечных разностей, интегральных уравнений).

Для зон экстремальной концентрации напряжений $\sigma_{\max K}$ и деформаций $e_{\max K}$, создаваемых дефектами типа трещин, в линейной механике разрушения роль α_σ выполняет коэффициент интенсивности напряжений K_I . По аналогии с выражением (22) можно записать

$$K_I = \sigma_{\max K}/\sigma, \quad (24)$$

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} f\{l, F, Q\}, \quad (25)$$

где σ — номинальное напряжение для образца с трещиной; l — глубина трещин; F и Q — параметры размеров сечения и способов нагружения.

Для случая упругопластического деформирования в рамках нелинейной механики разрушения в [2] получена связь, аналогичная выражению (22),

$$\{K_{I\sigma}, K_{I\epsilon}\} = f_{K_I}\{K_I, \sigma/\sigma_T, m\}. \quad (26)$$

Экспериментально и теоретически величины $K_I, K_{I\sigma}, K_{I\epsilon}$ определяют так же, как и $\alpha_\sigma, K_\sigma, K_\epsilon$.

Критерии разрушения

В теории и практике инженерных расчетов [1 – 10] используют обобщенные силовые (по напряжениям σ), деформационные (e) и энергетические (γ) критерии разрушения:

$$\sigma \leq \sigma_K, \quad e \leq e_K, \quad \gamma \leq \gamma_K. \quad (27)$$

При решении инженерных задач для штатных, нормальных условий эксплуатации наибольшее применение нашли силовые критерии ($\sigma \leq \sigma_K$). В этом случае в упругой области $e_K = \sigma_K/E$, $\gamma_K = \frac{\sigma_K e_K}{2} = \frac{\sigma_K^2}{2E}$; в пластической области при степенной аппроксимации диаграммы деформирования по уравнению состояния типа (7)

$$e_K = e_T(\sigma_K/\sigma_T)^{1/m}, \quad \sigma_K = \sigma_T(e_K/e_T)^m. \quad (28)$$

Для наиболее ответственных случаев в штатных и нештатных (в том числе аварийных и катастрофических) ситуациях все более широкое применение находят [2 – 7, 9] деформационные критерии разрушения ($e \leq e_K$). Исходные критериальные параметры σ_K и e_K , устанавливаемые по результатам испытаний стандартных образцов на однократное статическое разрушение (см. рис. 1), составят:

$$\sigma_K = f_\sigma\{\sigma_T, \sigma_B, S_K\}, \quad e_K = f_e\{e_T, e_B, e_K\}. \quad (29)$$

Деформационные критерии нашли свое нормативное отражение в расчетах прочности атомных реакторов [10]. При использовании в обобщенных расчетах деформационных параметров e и e_k необходимо учитывать влияние конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов — температур (t , T), времени (τ), цикличности (N), скорости деформирования ($\dot{e}$), концентрации напряжений (α_0), трещин (l , K_I), объема напряженного состояния (I_σ , D_e):

$$e^a = e_{k0} f_{e3} \{T, \tau, N, \dot{e}, l, I_\sigma, D_e, \alpha_0\}, \quad (30)$$

где e_{k0} — разрушающая деформация для гладкого лабораторного образца; I_σ , D_e — коэффициенты повышения первого главного напряжения и снижения пластичности за счет объема напряженного состояния $\{\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3\}$; по данным экспериментов $1 \leq I_\sigma \leq 2,5$, $0 \leq D_e \leq 1$.

При этом следует иметь в виду, что значения как силовых (σ_k), так и деформационных (e_k) критериев параметров существенно зависят от перечисленных выше факторов. При сопоставлении их величин и кинетики с эксплуатационными напряжениями и деформациями можно судить о нахождении анализируемого объекта на данной стадии эксплуатации в области допускаемых, опасных или критических состояний (рис. 4).

Заключение

Изложенные выше основы унифицированных подходов к построению диаграмм деформирования, анализу напряженно-деформированных состояний и критериев разрушения являются научной базой расчетов прочности, ресурса и трещиностойкости с учетом главных конструктивных (F , α_0 , K_I , K_e) и эксплуатационных (T , $\dot{e}$, N , D_e , l) параметров [1 – 10]. Конструкционные факторы отражаются в решениях краевых упругих и упругопластических задач по определению расчетными и экспериментальными методами напряженно-деформированных состояний (σ , e) создаваемых и эксплуатирующихся объектов.

Влияние технологических факторов производства материалов и вида их исходного формообразования для получения изделий, отражающееся на механических свойствах — характеристиках прочности и пластичности, оценивается по результатам испытаний лабораторных образцов.

Эксплуатационные факторы в наибольшей степени сказываются на механических свойствах материалов, что в свою очередь влияет на напряженно-деформированные и предельные состояния конструкций в их локальных зонах [2 – 7, 9].



Рис. 4. Характер изменения критических напряжений σ_k и деформаций e_k под влиянием температурных и эксплуатационных факторов

Fig. 4. The character of change in the values of critical stresses σ_k and strains e_k under impact of the temperature and operational factors

Согласно изложенному подходу, основанному на унифицированных методах расчетов и испытаний по системе выражений (1) – (4) для оценки условий безопасной эксплуатации и достижения предельных состояний, устанавливают критерияльные величины и ключевые запасы прочности, ресурса и трещиностойкости с отражением по комплексу выражений (5) – (30) названных конструкторских, технологических и эксплуатационных факторов.

Изложенный подход может быть распространен на решение новых, более сложных проблем надежности, живучести, безопасности, рисков и защищенности [5].

Финансирование работ

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н. А., Фортов В. Е. Машиностроение России: перспективы и риски развития. — М.: Наука, 2017. — 104 с.
2. Махутов Н. А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
3. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Развитие фундаментальных и прикладных исследований в области машиноведения на базе критериев прочности, ресурса, живучести и безопасности / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 81. № 10. С. 41 – 52. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-41-52.
4. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения / Под ред. Н. А. Махутова, Ю. Г. Матвиенко, А. Н. Романова. — М.: ЛЕНАНД, 2018. — 720 с.
5. Махутов Н. А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. — Новосибирск: Наука, 2017. — 724 с.
6. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Фундаментальные исследования проблем безопасной эксплуатации объектов техносферы на базе критериев прочности, ресурса и риска / Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. № 3. С. 7 – 24.

7. **Gadenin M. M.** Characteristics of mechanical properties of materials in studies of conditions of attainment of marginal stated / *Inorganic Materials*. 2013. Vol. 49. N 15. P 1352 – 1356. DOI: 10.1134/S0020168513150053.
8. **Морозов Е. М., Зернин М. В.** Контактные задачи механики разрушения. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2017. — 544 с.
9. **Махутов Н. А., Гаденин М. М.** Анализ предельных состояний и типов аварийных ситуаций в связи с оценкой ресурса безопасной эксплуатации / *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2019. № 2. С. 4 – 16.
10. ПНАЭ Г-7-002-86. Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
- Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2018. Vol. 81. N 10. P. 41 – 52. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-41-52 [in Russian].
4. Problems of strength, technogenic safety and constructional materials science / Ed. by N. A. Makhutov, Yu. G. Matvienko, A. N. Romanov. — Moscow: LENAND, 2018. — 720 p. [in Russian].
5. **Makhutov N. A.** Safety and risks: system researches and developments. — Novosibirsk: Nauka, 2017. — 724 p. [in Russian].
6. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Basic researches of problems of technosphere objects safe service on the basis of strength, resource and risk criteria / *Probl. Mashinostr. Avtomat.* 2018. N 3. P. 7 – 24 [in Russian].
7. **Gadenin M. M.** Characteristics of mechanical properties of materials in studies of conditions of attainment of marginal stated / *Inorganic Materials*. 2013. Vol. 49. N 15. P. 1352 – 1356. DOI: 10.1134/S0020168513150053.
8. **Morozov E. M., Zernin M. V.** Hertzian Problem of Fracture Mechanics. — Moscow: Knizhny Dom “LIBROCOM”, 2017. — 544 p. [in Russian].
9. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Analysis of limit states and emergency situations types at an estimation of a safety service life time / *Probl. Mashinostr. Avtomat.* 2019. N 2. P. 4 – 16 [in Russian].
10. ПНАЭ Г-7-002-86. Rules and norms in nuclear energetics. Strength calculation norms for equipment and pipelines of nuclear engine installations. — Moscow: Énergoatomizdat, 1989. — 525 p. [in Russian].

REFERENCES