

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ И ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Н.А. Махутов, М.М. Гаденин, В.В. Москвичев



МАХУТОВ
Николай
Андреевич

Член-корреспондент Российской академии наук, профессор, доктор технических наук. Заместитель Председателя Рабочей группы при Президенте РАН по анализу риска и проблем безопасности. Заведующий отделом прочности, живучести и безопасности машин и конструкций Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Специалист в области механики деформирования и разрушения, малоциклового и многоциклового усталости, проблем техногенной безопасности и рисков чрезвычайных ситуаций. Председатель Межгосударственного научного совета по чрезвычайным ситуациям стран СНГ. Автор более 700 научных трудов и изобретений, в том числе более 80 монографий.



ГАДЕНИН
Михаил
Матвеевич

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Специалист в области механики циклического упругопластического деформирования и разрушения, экспериментальных исследований механических свойств конструкционных материалов, техногенной безопасности и рисков. Автор более 250 научных трудов, в том числе 25 монографий.



МОСКВИЧЕВ
Владимир
Викторович

Доктор технических наук, профессор, заместитель председателя Президиума Красноярского научно-го центра Сибирского отделения РАН, заведующий отделом машиноведения Института вычислительного моделирования СО РАН, заведующий кафедрой «Диагностика и безопасность технических систем» Сибирского федерального университета. Специалист в области механики деформирования и разрушения материалов, конструкционной прочности, надежности и безопасности технических систем. Автор 310 работ, в том числе 14 монографий.

Введение

Становление и развитие различных отраслей машиностроения, а также отечественной науки о машинах в Советском союзе и России тесно связано с историей Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 70-летие которого отмечается научно-технической общественностью в ноябре 2008 г. Одно из основных направлений научных исследований института связано с решением проблем прочности, живучести, ресурса

и безопасности машин, конструкций и сложных технических систем. Результаты этих исследований широко используются в учебном процессе, в подготовке аспирантов и докторантов, освещаются в научной литературе, в том числе в издающемся Московским государственным индустриальным университетом научно-техническом журнале «Машиностроение и инженерное образование». Это направление научно-исследовательских работ и их публикация в свое время было поддержано академиком К.В. Фроловым.

Вопросы динамики и прочности машин стали одними из основных с момента организации в 1938 г. Института машиноведения в составе Отделения технических наук АН СССР, которым руководил академик-секретарь ОТН и одновременно директор ИМАШ академик Е.А. Чудаков [1]. В дальнейшем во второй половине XX в. под руководством академика А.А. Благонравова [2] в Институте уделяли большое внимание таким важным проблемам, как долговечность и надежность машин и конструкций. К началу XXI в. особенно актуальны стали проблемы живучести и безопасности всех основных объектов техносферы гражданского и оборонного назначения. Эти три группы научных и прикладных задач, решавшихся в Институте под руководством его директора академика К.В. Фролова [3] в составе Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, были сосредоточены в первый период в отдельных лабораториях и комплексах лабораторий, а с 1978 г. – в Отделе прочности, живучести и безопасности машин и конструкций.

1. Постановка проблем и развитие исследований прочности и безопасности

В постановках и решении проблем прочности, ресурса и безопасности в ИМАШ большую роль сыграли академики К.Ф. Фролов, С.В. Серенсен, Ю.Н. Работнов, В.В. Болотин, члены-корреспонденты И.А. Одинг, Н.Н. Давиденков, А.П. Гусенков, профессора Н.И. Пригоровский, Ф.М. Дименберг, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович, Г.В. Ужик, М.Г. Лозинский, А.И. Тананов, Г.Х. Хуршудов, А.К. Прейсс.

Институт машиноведения и Отдел прочности, живучести и безопасности машин и конструкций на протяжении своей научной деятельности взаимодействовали с ведущими научными и конструкторскими организациями таких отраслей промышленности, как авиация, ракетно-космическая техника, атомная и тепловая энергетика, транспорт, нефте-газохимия, металлургия, промышленное и гражданское строительство, станкостроение, горнодобывающая техника.

Выполненные фундаментальные и прикладные исследования и разработки позволили сформировать и развить научные основы конструкционной прочности и техногенной безопасности. Основы конструкционной прочности были заложены С.В. Серенсеном в 1930–1970 гг. и нашли свое отражение в его обобщающих публикациях [4] и многочисленных публикациях его учеников. Проблемы техногенной безопасности стали систематически разрабатываться в России, и в частности в ИМАШ РАН, два последних десятилетия, начиная с организации выполнения государственной научно-технической программы «Безопасность», научными руководителями которой в 1991–2004 гг. были К.В. Фролов и Н.А. Махутов. Результаты этих разработок отражены в многотомных изданиях серий «Безопасность России» [5] и «Прочность. Механика разрушения. Ресурс. Безопасность технических систем» [6], включая двухтомную монографию Н.А. Махутова [7].

Многовековое развитие техносферы является материальной основой жизнедеятельности. Возведение строительных конструкций (зданий, сооружений, мостов, промышленных и оборонных объектов), создание все более совершенных транспортных систем (надводный, железнодорожный, автомобильный, воздушный, подводный и космический транспорт), ввод в эксплуатацию все более мощных энергетических установок (паровые котлы, двигатели внутреннего сгорания, гидротурбины, газовые турбины, атомные и термоядерные реакторы) к началу XXI в. привело к постановке и решению комплекса сложнейших фундамен-

тальных и прикладных проблем. Эти решения в последние годы были закреплены новыми нормативно-правовыми требованиями (на уровне федеральных законов) и освещены в энциклопедических и справочных изданиях [5, 8, 9].

В число таких проблем включена исторически сложившаяся последовательность формирования фундаментальных научных основ разработки инженерных методов расчетов и испытаний, создания норм и правил проектирования и изготовления объектов техносферы, обеспечения их функционирования в заданных пределах проектных режимов и параметров. Важнейшими требованиями к штатному (нормальному) функционированию и проектным параметрам эксплуатации объектов техносферы стали базовые требования: «прочность I → жесткость и устойчивость II → ресурс III → надежность IV → живучесть V → безопасность VI → риск VII» (рис. 1).

Развитие методов расчета по традиционному направлению сопровождалось развитием объектов техносферы и методов обеспечения их работоспособности, что нашло свое отражение в публикациях [3, 5, 8, 9] и в сериях изданий Института машиноведения РАН и Института вычислительного моделирования СО РАН [4, 6, 10, 11].

В фундаментальных [10–12] и прикладных [5–8, 13] исследованиях последних трех десяти-

летий была поставлена новая задача определения и обеспечения комплексной безопасности объектов техносферы по критериям приемлемых и управляемых рисков. При такой постановке задачи только безопасность с заданными уровнями рисков дает основание к принятию (или отклонению) решений о допустимости реализации новых проектов или эксплуатации действующих объектов техносферы.

2. Расчетные характеристики конструкционной прочности и техногенной безопасности

Для всех объектов техносферы (по принятой в федеральном законодательстве классификации: критически важных объектов – КВО, опасных производственных объектов – ОПО, объектов технического регулирования – ОТР) комплексное решение проблем прочности, ресурса и безопасности в значительной степени сводится к научно обоснованному построению реальных и допустимых расчетных кривых, показанных на рис. 1, и удержанию состояний объектов в пределах допускаемых по уровням действующих напряжений σ и деформаций e :

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

$$[\sigma] = \frac{\sigma_f}{n_\sigma}, \quad [e] = \frac{e_f}{n_e}, \quad (2)$$

где σ_f и e_f – значения разрушающих напряжений и деформаций ($\sigma_f = \sigma_B$ – предел прочности,



Рис. 1. Общая структура обеспечения работоспособности объектов техносферы

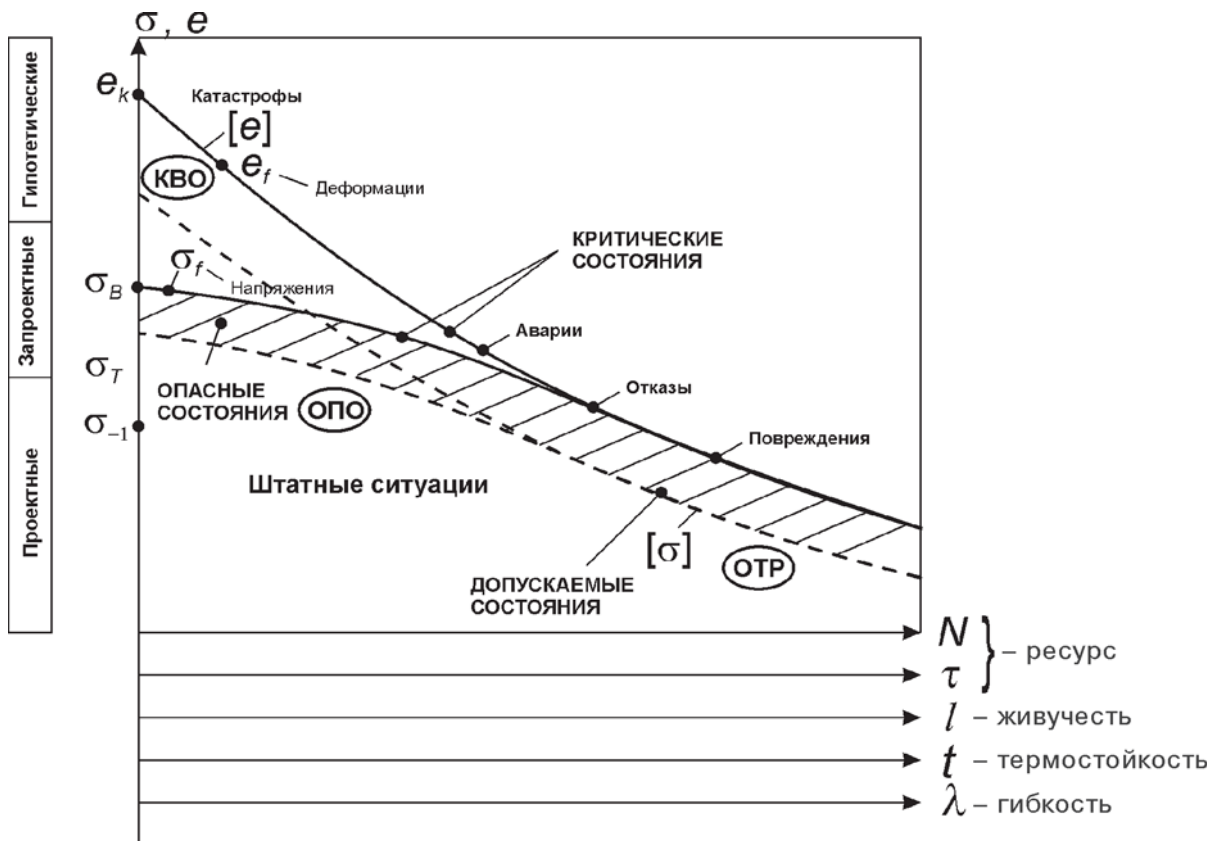


Рис. 2. Диаграммы опасных и безопасных состояний [7]

e_f – деформация при статическом разрыве); n_σ и n_e – запасы по разрушающим напряжениям и деформациям.

Это требование означает удержание в допускаемых пределах (соответствующие обозначения в квадратных скобках) основных расчетных параметров (рис. 2):

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

$$[N] = \frac{N_f}{n_N}, \quad [\tau] = \frac{\tau_f}{n_\tau}, \quad [l] = \frac{l_f}{n_l}, \quad [\lambda] = \frac{\lambda_f}{n_\lambda}, \quad (4)$$

где N – долговечность в циклах; τ – ресурс по времени; l – размер дефекта; t – температура эксплуатации; λ – характеристика жесткости системы; $N_f, \tau_f, l_f, \lambda_f$ – аналогичные разрушающие параметры; $n_N, n_\tau, n_l, n_\lambda$ – соответствующие им запасы.

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. Тогда выражения (1)–(4), подкрепленные необходимой статистической информацией, дают возмож-

ность оценить надежность объектов техносферы; это означает обеспечение заданного запаса n по установленной вероятности P для напряжений $n_{\sigma P}$ и деформаций n_{eP} . На основе (1) и (2) для напряжений и деформаций можно записать:

$$n_{\sigma P} = \frac{(\sigma_f)_P}{(\sigma)_P}, \quad n_{eP} = \frac{(e_f)_P}{(e)_P}. \quad (5)$$

Аналогично можно оценить вероятностные характеристики по другим запасам, входящим в выражения (3) и (4).

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

Невыполнение запасов по (1)–(4) с веро-

ятностью P приводит к увеличению затрат (ущербов) U , связанных с минимизацией последствий повреждений, отказов, аварий и катастроф и являющихся статистически варьируемыми. Однако в первом приближении их можно принять детерминированными и на этой основе дается оценка рисков R как суммы произведений P на U для каждого i -опасного состояния:

$$R = \sum_i P_i \cdot U_i. \quad (6)$$

До настоящего времени в большинстве случаев задачи прочности, ресурса и безопасности рассматривались как отдельные и самостоятельные; также строились расчетные кривые по рис. 2 для предельных и допускаемых состояний со своими обычно не связанными запасами по выражениям (1)–(6).

В ИМАШ РАН на протяжении длительного времени разрабатывалась методология построения единой системы расчетных уравнений, единых критериев и взаимоувязанных запасов [5, 6, 10–13]. При этом в основу были положены деформационные критерии прочности, ресурса и живучести [7, 12], что позволяло с единых позиций описать:

- кратковременные статические разрушения, используемые в анализе статической прочности;
- циклические (мало- и многоцикловые) разрушения, используемые в анализе циклического ресурса;
- длительные статические разрушения, используемые в анализе временного ресурса;
- длительные циклические разрушения, используемые в анализе циклического ресурса во временной постановке;
- динамические процессы разрушения, используемые в анализе динамической прочности и секундного ресурса;
- вязкие, квазихрупкие и хрупкие разрушения, используемые в анализе кратковременной живучести по критериям трещиностойкости линейной и нелинейной механики разрушения;
- циклический рост трещин, используемый для анализа циклической живучести по крите-

риям трещиностойкости линейной и нелинейной механики разрушения [6, 7, 10–16].

Результаты расчетов и испытаний лабораторных образцов, моделей и натурных конструкций объектов техносферы подтверждают возможность такого подхода.

В связи с изложенным наиболее важные значения приобретают диаграммы деформирования, получаемые при стандартных кратковременных механических испытаниях, по которым определяются базовые характеристики механических свойств, входящие во все указанные выше расчеты:

- модуль упругости E ;
- предел текучести σ_T (или условный предел текучести $\sigma_{0.2}$) и деформация на его уровне e_T ;
- сопротивление разрыву в шейке S_K ;
- предельная пластическая деформация при разрыве в шейке (относительное сужение) ψ_K .

По значениям этих характеристик или по экспериментальным данным получают другие важные расчетные параметры:

- предел прочности (кратковременное сопротивление разрушению) σ_B ;
- модуль G_T или показатель упрочнения m в упругопластической области;
- предельная равномерная пластическая деформация e_p , численно равная показателю упрочнения m .

В случае комплексного анализа прочности, ресурса и безопасности кривая деформирования в истинных координатах (истинных напряжениях и истинных деформациях) записывается в форме:

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

$$m = \lg(S_K / \sigma_T) / \lg(e_K / e_T), \quad (8)$$

где $e_K = \ln \frac{100}{100 - \psi_K}$ – истинная деформация при разрушении.

Тогда для расчетов статической прочности на основе (1) используются выражения:

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

где n_B , n_T , n_S – запасы по пределу прочности, пределу текучести и сопротивлению разрыву.

Для расчетов статической жесткости можно использовать аналогичные состояния:

$$[e] = \min \left\{ \frac{e_t}{n_{et}}, \frac{e_t}{n_{ep}}, \frac{e_k}{n_{ek}} \right\}, \quad (10)$$

где n_{ep} , n_{ek} – запасы по равномерной пластической и разрушающей деформации.

Если жесткость определяется в пределах упругости, то $n_t = n_{et}$; если за пределами упругости, то $n_t \leq n_{et} \leq n_{ep} \leq n_{ek}$.

Для оценки напряжений σ_y по условию устойчивости используются 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 – показатель устойчивости, зависящий от условий закрепления стержня.

Таким образом, расчеты прочности, жесткости и устойчивости проводятся с использованием таких базовых характеристик материала, как E , σ_t , σ_b , ψ_k , по которым определяются параметры e_k , m , S_k . Получение максимально-го объема расчетной информации по результатам стандартных испытаний рассматривается как основа комплексной расчетно-экспериментальной оценки прочности, ресурса и безопасности.

Для циклического нагружения (с заданными амплитудами деформации) кривая усталости в широком диапазоне чисел циклов N ($10^0 \leq N \leq 10^9$) и температур t ($t \leq 0,4t_{пл}$, $t_{пл}$ – температура плавления) строится на основе результатов испытаний лабораторных образцов или расчетным путем [6–8, 10–13]:

$$\sigma_a^* = \frac{E^t}{4(N)^{m_p + (1+r^*)/(1-r^*)}} \ln \frac{100}{100 - \psi_k^t} + \frac{S_k^t}{4(N)^{m_e + (1+r)/(1-r)}}, \quad (12)$$

где σ_a^* – амплитуда условных упругих напряжений ($\sigma_a^* = e_a \cdot E^t$, e_a – амплитуда упругопластических деформаций; здесь и далее индексы t и τ у соответствующих параметров обозначают их значения для температуры t и времени τ); m_p , m_e – параметры материала, зависящие от

отношения σ_t/σ_b ; r^* , r – коэффициенты асимметрии деформаций и напряжений.

Для расчета циклического ресурса в (12) используются два запаса – по напряжениям n_σ и по долговечности n_N – при этом допускаемый ресурс $[N]$ принимается минимальным по двум запасам.

В соответствии с (12) сопротивление усталости определяется через константы материала E^t , ψ_k^t , S_k^t с учетом отношений σ_t^t/σ_b^t . При длительном высокотемпературном нагружении базовыми являются кривые длительной прочности σ_{bt}^t и пластичности ψ_{kt}^t для времени τ при температуре t :

$$\sigma_{bt}^t = \sigma_b^t (\tau_0/\tau)^{m_b}, \quad (13)$$

$$\psi_{kt}^t = \psi_k^t (\tau_0/\tau)^{m_\psi},$$

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 .

В тех случаях, когда потенциально опасные объекты техносферы подвергаются циклическому нагружению в области высоких температур, экспериментально получают кривые длительной циклической прочности в координатах “амплитуда условных упругих напряжений σ_{at}^* – долговечность N_τ ” ($\sigma_{at}^* - N_\tau$) по параметру времени τ , варьируя при этом время выдержки в цикле τ_τ . При отсутствии возможностей проведения таких экспериментов строятся расчетные зависимости $\sigma_{at}^* - N_\tau$ и для них

$$\tau = \tau_\tau \cdot N_\tau. \quad (14)$$

Тогда, подставляя (14) в (13) и в (12), можно получить кривые $\sigma_{at}^* - N_\tau$ по параметру τ_τ . В них в качестве базовых используются характеристики механических свойств материалов E^t , σ_t^t , σ_b^t , ψ_k^t , а в качестве расчетных параметров – e_k^t , $\sigma_{0,2}^t/\sigma_b^t$.

При оценках эффекта температур t , отличающихся от комнатной $t_0 = 20$ °С (как в области низких климатических $20 \geq t \geq -60$ °С, так и в области криогенных $-60 \geq t \geq -270$ °С, повышенных $20 \leq t \leq 350$ °С и высоких $350 \leq t \leq 1000$ °С) стандартные испытания проводятся в термокриокамерах. При отсутствии результатов таких испытаний строятся [7, 12] расчетные зависимости ме-

ханических свойств материала от температуры t (в градусах Цельсия) или T (в градусах Кельвина, $T=t+273$):

$$\begin{aligned}\sigma_T^t &= \sigma_T \exp \left\{ \beta_T \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}, \\ \sigma_B^t &= \sigma_B \exp \left\{ \beta_B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\},\end{aligned}\quad (15)$$

где β_T и β_B – расчетные характеристики материала, зависящие от σ_T , а T_0 – комнатная температура в градусах Кельвина.

Предельные пластические деформации ψ_k^t определяются в процессе расчета через ψ_k , σ_T и σ_B при комнатной температуре.

Для динамически нагруженных конструкций при повышенных скоростях деформирования $\dot{\epsilon}=d\epsilon/d\tau$ ($10^0 \text{ с}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^3 \text{ с}^{-1}$) наблюдается увеличение пределов текучести $\sigma_T^{\dot{\epsilon}}$ и прочности $\sigma_B^{\dot{\epsilon}}$ для этих условий, определяемое экспериментально или расчетом по степенным уравнениям:

$$\begin{aligned}\sigma_T^{\dot{\epsilon}} &= \sigma_T (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{m_{\text{er}}}, \\ \sigma_B^{\dot{\epsilon}} &= \sigma_B (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{m_{\text{eb}}},\end{aligned}\quad (16)$$

где m_{er} , m_{eb} – показатели чувствительности к скорости деформирования, зависящие от σ_T ; $\dot{\epsilon}$ и $\dot{\epsilon}_0$ – скорости деформирования соответственно при высокоскоростном нагружении и при статическом нагружении в условиях стандартных испытаний.

Расчет характеристик динамической пластичности осуществляется через ψ_k , σ_T и σ_B по тем же соотношениям, которые используются для описания температурных эффектов.

Уравнения (13), (15) и (16) дают возможность расчетного определения показателя упрочнения m в уравнении (8).

Вся система базовых экспериментально определяемых (E , σ_T , σ_B , ψ_k) и расчетных (m , S_k , m_p , m_e , m_b , m_{ψ} , β_T , β_B , $m_B^{\dot{\epsilon}}$, $m_T^{\dot{\epsilon}}$) характеристик устанавливается по результатам механических испытаний гладких стандартных образцов [6–8, 10–16].

Реальные несущие элементы потенциально опасных объектов (ОТР, ОПО, КВО) содержат различные зоны концентрации и имеют различные 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 и требует больших затрат машинного времени. Для большой группы конструкционных металлических материалов с использованием модифицированных аналитических решений (типа Нейбера) была получена [7, 12] связь 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 коэффициента упрочнения m :

$$\{K_\sigma, K_\epsilon\} = F_K \{\alpha_\sigma, \sigma/\sigma_T, m\}. \quad (17)$$

Для экспериментальной оценки влияния размеров поперечных сечений анализируемых элементов на механические свойства были проведены уникальные испытания [6, 7, 11–13] серии образцов с варьированием площади сечения F на пять порядков (от 3–4 мм² до 4·10⁵ мм²). Обобщение результатов этих испытаний при разрушающих усилиях от 2·10³ до 8·10⁷ Н позволило записать систему расчетных степенных уравнений [7]:

$$\begin{aligned}\sigma_T^F &= \sigma_T (F_0/F)^{m_{TF}}, \\ \sigma_B^F &= \sigma_B (F_0/F)^{m_{BF}}, \\ \psi_k^F &= \psi_k (F_0/F)^{m_{\psi F}},\end{aligned}\quad (18)$$

где m_{TF} , m_{BF} , $m_{\psi F}$ – характеристики не отдельных стальных, а их групп (по уровню прочности и степени легирования ($m_{TF} \approx m_{BF} = 0,013$, $m_{\psi F} = 0,024–0,04$); F_0 – площадь поперечного сечения стандартного лабораторного образца).

Реальные несущие элементы отличаются от стандартных лабораторных образцов на растяжение объемом локального и местного напряженного состояния. Для получения зависимостей базовых характеристик механических свойств от вида напряженного состояния с компонентами главных напряжений $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ проводятся 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 об-

разцов с концентрацией напряжений ($\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 \neq 0$, $\sigma_3 \neq 0$). При отсутствии таких экспериментальных данных было предложено учитывать объемность напряженного состояния [7, 12] через:

- коэффициент повышения сопротивления образованию пластических деформаций

$$I_\sigma = \sqrt{2/[(1 + \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3) + (\bar{\sigma}_3 + 1)^2]}; \quad (19)$$

- коэффициент снижения предельной пластичности

$$D_e = 1/I_\sigma(1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3), \quad (20)$$

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

Для оценки характеристик живучести при наличии дефектов типа трещин в несущих конструкциях проводятся стандартные, унифицированные и специальные испытания образцов с вариацией размеров трещин l , площади сечений F , способов нагружения Q [6, 7, 10–16]. В рамках линейной механики разрушения принято, что фундаментальной новой характеристикой трещиностойкости при статическом и циклическом нагружениях является критическая величина коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} :

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi l} \cdot F\{l, F, Q\}, \quad (21)$$

где σ_c – разрушающее напряжение для образца с трещиной с ограничением $\sigma_c \leq (0,9–1,0)\sigma_T$.

Вместе с тем, в результате многочисленных экспериментов было показано, что при изменении l , F , Q , а также температуры t , времени τ , скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ и объемности напряженного состояния I_σ , D_e базовая характеристика K_{Ic} по (20) изменяется (как изменяются и другие базовые характеристики, σ_T , σ_b , ψ_k по (13), (15)–(20)).

Наиболее приемлемыми в комплексной оценке прочности, ресурса и безопасности являются [6, 7, 12, 16] минимальные значения K_{Ic}^* , определяемые на цилиндрических образцах с круговой трещиной и позволяющие рассчитывать величины K_{Ic} с учетом их изменения при варьировании параметров l , F , Q , t , τ , I_σ , D_e через базовые характеристики s_T , m , e_k . В более общем случае, когда не выполняются условия линейной механики разрушения и воз-

никают значительные деформации пластичности и ползучести, вместо общепринятых характеристик K_{Ic} , критического интеграла J_c и критического раскрытия трещин d_c в [12] был развит деформационный критерий K_{Iec} – критический коэффициент интенсивности деформаций. Он выполняет по существу ту же роль, что и коэффициент концентрации деформаций K_e в (17) при условии аналогии a_s и K_I . При этом модифицированное аналитическое решение типа (17) дает [7, 12] зависимость коэффициентов интенсивности напряжений $\bar{K}_I$ и деформаций $\bar{K}_{Ie}$ в относительных величинах (при использовании относительных напряжений):

$$\begin{aligned} \bar{K}_{Ie} &= \bar{K}_I^{p_{ke}}, \\ p_{ke} &= \frac{2 - n(1-m)(1-\bar{\sigma}_n)}{1+m}, \end{aligned} \quad (22)$$

где p_{ke} – обобщенный параметр, зависящий от показателя упрочнения m , относительного уровня номинальных напряжений $\bar{\sigma}_n = \sigma_n/\sigma_T$; n – характеристика типа конструкционного материала ($n \approx 0,5$).

Величина относительного коэффициента интенсивности напряжений с учетом (21) равна:

$$\bar{K}_I = \bar{\sigma}_n \sqrt{\pi l} \cdot F\{l, F, Q\}. \quad (23)$$

Выражения (17) и (23) позволяют получить условие локального разрушения образования трещины по (17) и ее развития по (22). На основе деформационного критерия для однородного напряженного состояния (при статическом разрыве гладкого образца) можно записать:

$$\bar{e}_k = \frac{1}{e_T} \ln \frac{100}{100 - \psi_k}. \quad (24)$$

В зоне концентрации расчетная относительная критическая деформация $\bar{e}_{kmax} = \bar{e}_f$ снижается в соответствии с (13), (18), (19), (20).

При наличии трещин и использовании локального критерия $\bar{e}_{kmax}$ было получено выражение для построения диаграммы разрушения, связывающего приращение длины трещины Δl с величиной номинального напряжения $\bar{\sigma}_n$ и расчетными параметрами механических свойств [7, 12] в форме

$$\Delta l = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\bar{K}_{Ie}}{\bar{e}_f} \right)^2. \quad (25)$$

Если процесс нагружения циклический, то

величина Δl эквивалентна приращению трещины в заданном цикле $\Delta l = \frac{dl}{dN}$, а основным параметром нагружения оказывается размах коэффициента интенсивности деформаций $\Delta K_{le}^{(k)}$ в данном k -полуцикле нагружения с показателем упрочнения $m=m(k)$. Величина $m(k)$ зависит от циклических свойств материалов, которые бывают циклически стабильными – $m(k)$ не изменяется по числу полуциклов k , циклически упрочняющимися – $m(k)$ увеличивается с ростом k , циклически разупрочняющимися – $m(k)$ уменьшаются с ростом k . Для этих условий обосновано уравнение, описывающее кинетику развития усталостных трещин [12]:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta K_{le}^{(k)}}{\bar{\sigma}_f} \right)^2 = \frac{1}{2\pi \bar{\sigma}_f^2} (\Delta K_{le}^{(k)})^2 = C_e (\Delta K_I)^{m_e}. \quad (26)$$

Выражение (26) с учетом (22), (23) аналогично известному уравнению Пэриса-Эрдогана $\frac{dl}{dN} = C(DK_I)^{m_k}$, когда C и m_k – константы материала; однако в (26) величины C и m являются переменными и рассчитываемыми.

Механические испытания для определения $\bar{K}_{le}$, $\bar{K}_{lec}$, dl/dN в общем случае в рамках нелинейной механики разрушения являются более сложными, чем испытания в рамках линейной механики разрушения с определением K_{Ic} и dl/dN [6, 7, 10–16]. В нелинейном случае необходимы исследования эффектов перераспределения локальных пластических деформаций и деформаций ползучести, зависящих в вероятностной постановке от $\bar{\sigma}_n$, m , t , τ , N , F , $\dot{\epsilon}$, I_σ , D_ϵ .

Такая сложность преодолевается в рамках развиваемых деформационных критериев разрушения при постановках общих проблем анализа прочности по (1), (3), (4), (9), (10), ресурса по (3), (4), (12), надежности по (5), живучести по (3), (4), (25), (26), рисков по (5), (6). Практические решения этих проблем осуществлялись [5, 6, 7, 11, 13, 14] для таких высокорисковых объектов (ОПО, КВО), как атомные реакторы, тепловые энергоустановки, летательные аппараты, магистральные трубопроводы, уникальные инженерные сооружения. При этом в качестве базовых приняты стандартные харак-

теристики механических свойств (σ_r , σ_b , E , ψ_k), степенные и экспоненциальные уравнения состояния по (7), степенные уравнения для оценки локальных деформированных состояний по (17) и (27), кривых усталости по (12), длительной и динамической прочности и пластичности по (13) и (16), с учетом эффекта абсолютных размеров по (18), концентрации напряжений и деформаций по (17) и объемности напряженного состояния по (9) и (20).

Экспериментальное определение всех расчетных параметров, входящих в указанные выше уравнения, становится все более необходимым по мере того, как возрастают фундаментальные, законодательные и нормативные требования к безопасности, а сама безопасность становится количественно рассчитываемым важнейшим свойством любого объекта техносферы – будет ли это объект технического регулирования, опасный производственный объект или критически важный объект. Таким образом, в изложенных выше положениях развиваются единые системы расчетных уравнений (1)–(26) с использованием экспериментально определенных базовых и унифицированных расчетных характеристик механических свойств [5–17], которые являются основой расчетно-экспериментальной оценки прочности, ресурса, живучести и безопасности технических систем.

Список литературы

1. Чудаков Е.А. Теория автомобиля: Учебник для вузов. – М.: Машгиз, 1950. – 683 с.
2. Фролов К.В., Пархоменко А.А., Усков М.К. Анатолий Аркадьевич Благоднравов. – М.: Наука, 1982. – 350 с.
3. Достижения и задачи машиноведения. К 70-летию академика К.В.Фролова. – М.: МГФ «Знание», 2006. – 416 с.
4. Серенсен С.В. Избранные труды. – Киев: Наукова думка, 1985. Т.1 – 262 с.; Т.2 – 256 с.; Т.3 – 232 с.
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. – М.: МГФ «Знание», 1997–2007.

- Т. 1–30.
6. Прочность. Механика разрушения. Ресурс. Безопасность технических систем: Серия из 8 кн. – Новосибирск: Наука, 2002 – 2006.
 7. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2-х ч. – Новосибирск: Наука, 2005. Часть 1: Критерии прочности и ресурса – 494 с.; Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности – 610 с.
 8. Машиностроение: Энциклопедия. – М.: Машиностроение, 1994–2006. Т. 1–29.
 9. Гражданская защита: Энциклопедия. – М.: Московская типография № 2, 2006–2007. Т. I–IV.
 10. Исследования прочности при малоцикловом нагружении: Серия из 8 кн. – М.: Наука, 1975–2006.
 11. Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов: Серия из 6 кн. – М.: Наука, 1987–2004.
 12. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
 13. Махутов Н.А., Пермяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 516 с.
 14. Проблемы разрушения, ресурса и безопасности технических систем. К 60-летию чл.-корр. РАН Н.А. Махутова / Под ред. В.В. Москвичева, М.М. Гаденина, А.П. Черняева. – Красноярск: КОДАС, 1997. – 519 с.
 15. Прочность, ресурс и безопасность машин и конструкций / Под ред. Н.А. Махутова, М.М. Гаденина. – М.: ИМАШ РАН, 2000. – 527 с.
 16. Механика катастроф / Под ред. Н.А. Махутова, Е.М. Морозова, М.М. Гаденина. – М.: МИБ СТС, 1995. Т. 1. – 359 с.; 2001. Т. 2. – 254 с.
 17. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Научные исследования и подготовка специалистов по обеспечению защищенности критически важных объектов // Машиностроение и инженерное образование. 2004. № 1. С. 19–32.