

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

Прочность, ресурс и безопасность технических систем

К. В. Фролов, Н. А. Махутов, Г. Х. Хуршудов, М. М. Гаденин

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Рассматривается эволюция подходов к решению проблем динамики и прочности машин на основе определения статических и динамических номинальных и локальных напряжений от эксплуатационных нагрузок. Показано, как в качестве основополагающих критериальных параметров деформативности и прочности конструкционных материалов последовательно использовались характеристики прочности и пластичности материала, характеристики циклической прочности в области обычной и малоциклового усталости, характеристики высокотемпературной длительной прочности и ползучести, а также характеристики линейной и нелинейной механики разрушения.

Особое внимание уделено результатам исследований по безопасности машин и механике катастроф. При этом рассматриваются комплексные подходы к решению проблем прочности и безопасности потенциально опасных объектов (атомные электростанции, ракетно-космические комплексы, летательные аппараты, химические производства и др.) на основе анализа всех стадий их жизненного цикла, включая проектирование, изготовление, испытания и эксплуатацию.

Ключевые слова: прочность, ресурс, инженерная безопасность, напряжение, деформация, повреждение, усталость, ползучесть, механика разрушения

Институт машиноведения (ИМАШ) РАН и Институт проблем прочности (ИПП) НАН Украины на протяжении многих десятилетий вели фундаментальные и прикладные исследования в рамках проблемных академических планов, государственных научно-технических программ и крупных проектов. Основная задача этих исследований – получение фазовых закономерностей процессов деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций при экстремальных штатных и аварийных режимах [1–3]. ИМАШ РАН и ИПП НАН Украины во взаимодействии с ведущими институтами и конструкторскими бюро использовали полученные результаты при обосновании прочности, ресурса и безопасности сложных технических систем в энергетике, ракетно-космической и авиационной технике, в транспортных комплексах. Существенная роль в организации и координации этих исследований принадлежала и принадлежит руководителям и ведущим специалистам ИПП НАН Украины (академики Г. С. Писаренко, В. Т. Трощенко, А. А. Лебедев и Н. В. Новиков) и ИМАШ РАН (академики А. А. Благонравов, К. В. Фролов и С. В. Серенсен).

Прочность и безопасность машин и конструкций стали одним из актуальных направлений технического развития по мере роста их рабочих пара-

метров и повышения потенциальной опасности высокорисковых систем “человек – машина – среда”.

Основополагающим разделом указанных выше проблем были и остаются вопросы динамики и прочности машин [1–7]. При этом решение задач теории упругости, теории колебаний, теории пластин и оболочек сводилось к определению статических и динамических номинальных и локальных напряжений σ^3 от эксплуатационных нагрузок P^3 . В качестве критериальных параметров деформативности и прочности конструкционных материалов использовались модуль упругости E , пределы текучести σ_T и прочности σ_b

$$\sigma^3 = f(P^3) \leq \left\{ \frac{\sigma_T}{n_T}, \frac{\sigma_b}{n_b} \right\}, \quad (1)$$

где n_T, n_b – соответствующие запасы текучести и прочности.

Уравнение (1) получило и получает приложения при создании автомобилей, сельскохозяйственной техники, энергетического и технологического оборудования широкого применения.

В годы Великой Отечественной войны и первые послевоенные годы были поставлены исследования по усталости и долговечности материалов. К основным параметрам эксплуатационной нагруженности машин были отнесены напряжения σ^3 и число циклов нагружения N^3 . В дополнение к уравнению (1) сформулированы условия циклической прочности:

$$\sigma_a^3 = f(P^3, N^3) \leq \left\{ \frac{\sigma_{-1}}{n_\sigma (K_\sigma \bar{\sigma}_a^3) \varepsilon_\sigma + \psi_\sigma \bar{\sigma}_m^3} \right\}, \quad (2)$$

где $\bar{\sigma}_a^3, \bar{\sigma}_m^3$ – амплитуды и среднее напряжение цикла ($\bar{\sigma} = \sigma / \sigma_{-1}$); σ_{-1} – предел выносливости конструкционного материала; $K_\sigma, \varepsilon_\sigma, \psi_\sigma$ – характеристики чувствительности материала к концентрации напряжений, абсолютным размерам и асимметрии цикла.

По уравнениям (1) и (2) рассчитывались прочность и долговечность несущих узлов в авиации, на транспорте, в гидроэнергетике. Для анализа местных напряжений были развиты методы фотоупругости и тензометрии.

С освоением районов Сибири и Севера и созданием объектов криогенной техники в 50–60-е годы возникла задача об исследовании низкотемпературной прочности с определением характеристик хладноломкости. В анализ прочности дополнительно были введены [1–4] характеристики низкотемпературного локального сопротивления отрыву $S_{от}$:

$$\sigma_a^3 = f(P^3, N^3, t^3) \leq \left\{ \frac{S_{от}}{n_\sigma K_\sigma} \right\}, \quad (3)$$

где K_σ – коэффициент концентрации напряжений с учетом перераспределения напряжений за счет местных пластических деформаций.

Важное значение при этом имели исследования по локальным структурным физико-механическим процессам формирования микродеформаций и микроразрушений в материале с использованием методов рентгенографии и микроскопии.

Для интенсивно развивавшихся в 60-е годы отраслей авиационного, энергетического и нефтехимического машиностроения были поставлены систематические исследования по малоциклового усталости [1, 2, 4, 5]. Создание в зонах действия концентрации и температурных напряжений областей неупругого циклического деформирования потребовало перехода от расчетов в локальных напряжениях к расчетам в локальных деформациях:

$$\{\sigma^3, e^3, N^3\} = f(P^3, N^3, t^3, m) \leq \left\{ \left[\left(\frac{\sigma_c}{n_\sigma} \right) \left(\frac{e_c}{n_e} \right) \left(\frac{N_c}{n_N} \right) \right] f(\sigma_\tau, \psi_k, m_p, m_e) \right\}, \quad (4)$$

где σ_c, e_c, N_c – предельные напряжения, деформации и число циклов,

$$\sigma_c = S_{от}, \quad e_c = \frac{1}{1 - \psi_k};$$

m – характеристика упрочнения в упругопластической области; ψ_k – сужение при однократном разрушении; m_p, m_e – характеристики кривой малоциклового разрушения.

Для определения σ^3, e^3 были развиты методы фотоупругих наклеек, муара, малобазных сеток и малобазной тензометрии [1, 2, 5, 6].

Применительно к новым задачам сверхзвуковой авиации, теплоэнергетики, нефтехимии, металлургии были поставлены исследования по ползучести, высокотемпературной кратковременной длительной и циклической (500...3000°C) прочности, в том числе при программных и двухчастотных режимах нагружения [1, 2, 4–9]. К уравнениям (1), (2) и (4) при расчетах деталей машин были добавлены уравнения длительной (по времени эксплуатации τ^3) прочности $\sigma_{д.п}^\tau$

$$\{\sigma^3, e^3, \tau^3, N^3\} = f(P^3, \tau^3, N^3, t^3) \leq \left\{ \left(\frac{\sigma_{д.п}^\tau}{n_\sigma}, \frac{e_c^\tau}{n_e}, \frac{\tau_c}{n_\tau} \right), f(m_\tau) \right\}, \quad (5)$$

где n_τ – запас по времени τ ; m_τ – характеристика кривой длительной прочности.

Измерения локальных напряжений и деформаций выполнялись высокотемпературными методами тензометрии и муара на технических объектах в нашей стране и за рубежом [6, 9, 10].

Развитие и обобщение большого цикла работ по прочности и долговечности в 60–70-е годы привело к формированию одного из важных разделов проектирования, изготовления и эксплуатации машин – разделу обеспечения их надежности и ресурса [1, 2, 4, 5]. Это, в первую очередь, относилось к изделиям общего машиностроения, работающим при переменных режимах термоциклического нагружения. Для развития уравнений (1) и (2) в расчет по кривым усталости $\sigma - N$ были введены коэффициенты вариации эксплуатационной нагруженности v_σ , пределов выносливости v_{σ_a} , а также конструкторско-технологических факторов ($K_\sigma, \varepsilon_\sigma, \psi_\sigma$). Эти подходы распространились и на малоцикловую усталость.

В конце 60-х и начале 70-х годов большое внимание уделялось развитию линейной и нелинейной механики статического, циклического и динамического разрушений [1, 2, 5, 8]. При этом расчеты трещиностойкости машин стали базироваться на местных напряжениях σ^3 и деформациях e^3 , на учете размеров дефектов l^3 , коэффициентов интенсивности напряжений K_I^3 и деформаций K_{Ie}^3 , температурных условий нагружения t^3 :

$$\{\sigma^3, e^3, K_I^3, K_{Ie}^3\} = f(P^3, t^3, l^3) \leq \left\{ \frac{\sigma_c}{n_\sigma}, \frac{e_c}{n_e}, \frac{K_{Ic}}{n_k}, \frac{K_{Iec}}{n_{ke}} \right\}, \quad (6)$$

где n_k, n_{ke} – запасы по коэффициентам интенсивности напряжений и деформаций.

Уравнение (6) получило нормативное применение в расчетах прочности атомных реакторов, сосудов давления, трубопроводов [1, 2, 5, 11, 12].

В 80-е годы на базе ранее выполненных комплексных исследований с учетом новых задач в области ракетостроения, атомной и термоядерной энергетики получили развитие методы анализа прочности, ресурса, трещиностойкости и живучести машин с учетом повреждений технологического и эксплуатационного происхождения [1, 2, 5, 11, 12].

К уравнениям (1)–(6) были добавлены уравнения для оценки ресурса с учетом длительного и циклического развития трещин:

$$\{\sigma^3, e^3, K_{Ie}^3, N^3, \tau^3, t^3\} = f(P^3, t^3, l^3) \leq \left\{ \frac{\sigma_c}{n_\sigma}, \frac{e_c}{n_e}, \frac{N_c}{n_N}, \frac{\tau_c}{n_\tau}, \frac{t_c}{n_t} \right\}, \quad (7)$$

где c – индекс для критических характеристик; n_N, n_τ, n_t – запасы по числу циклов, времени и температурам.

Расчетные характеристики N_c и τ_c определяются интегрированием кинетических диаграмм разрушения

$$\{N_c, \tau_c\} = F \left\{ (\Delta K_{Ie}^3), \left(\frac{dl^3}{dN}, \frac{dl^3}{d\tau} \right) \right\}, \quad (8)$$

где ΔK_{Ie}^3 – размах коэффициентов интенсивности деформаций.

Для анализа процессов повреждения использовались методы импульсной голографии, термовидения, тензочувствительных покрытий, рентгенографии, микроструктурного анализа виброметрии [1, 4, 5, 9, 10].

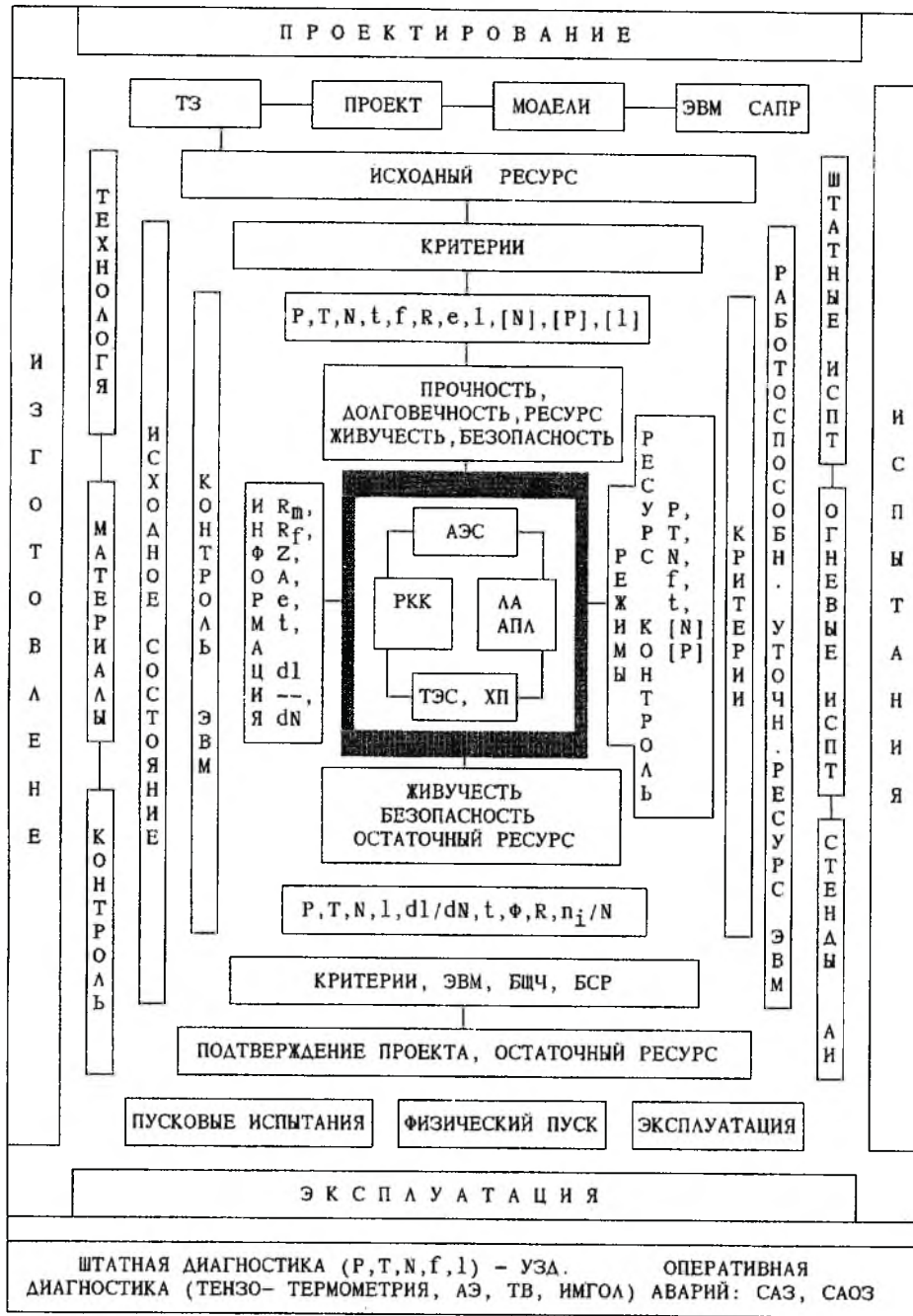
В последнее десятилетие были поставлены и начаты исследования по безопасности машин и механике катастроф [13–15]. Применительно к потенциально опасным объектам эти разработки включают комплексные исследования по всем перечисленным выше направлениям с использованием аналитических, численных и экспериментальных методов анализа напряженно-деформированных и предельных состояний.

На основе уравнений (1)–(8) был внесен большой вклад в реализацию крупнейших проектов страны – уникальные гидравлические и тепловые турбины мощностью 200–1200 МВт, атомные энергетические реакторы (на тепловых ВВЭР, РБМК, АСТ и быстрых нейтронах ВН) мощностью 210–1000 МВт (для АЭС в бывших СССР и Чехословакии, Финляндии, Германии, Болгарии, Венгрии), термоядерные установки Т-14, Т-15, Ангара-5, крупнейшие аэродинамические трубы Т-128 и Т-1110, авиационные и ракетные двигатели НК и АЛ, головные образцы летательных аппаратов авиационной (ТУ, МИ) и космической (Р-7, Н-1) техники. Важнейшие работы были проведены при создании космической системы “Энергия–Буран”, объектов оборонной техники, ядерного над- и подводного флотов.

Проведение фундаментальных и прикладных исследований по нелинейной механике деформирования и разрушения позволяет реализовать базовую схему определения и регулирования безопасности на всех этапах их жизненного цикла [1, 2, 13–15].

На рисунке приведена комплексная блок-схема решения проблем прочности и безопасности таких потенциально опасных объектов, как атомные электростанции (АЭС), ракетно-космические комплексы (РКК), летательные аппараты (ЛА), атомные подводные лодки (АПЛ), теплоэлектростанции (ТЭС), химические производства (ХП). Эти проблемы охватывают все стадии жизненного цикла объектов: проектирование, изготовление, испытание и эксплуатацию.

Проектирование включает в себя разработку и согласование технического задания (ТЗ) с введением базовых требований по прочности, ресурсу и безопасности. Сама разработка проекта состоит из ряда стадий (принципиальные схемы, предэскизный, технический и рабочий проекты). На этой стадии разрабатываются физические и математические модели с применением ЭВМ и систем автоматизированного проектирования (САПР). На стадии проектирования анализируется прочность на основании нормативных и дополнительных расчетов и обосновывается исходный ресурс. Основными критериями и характеристиками таких расчетов являются: эксплуатационные нагрузки P^3 , температуры $T(t)$, числа циклов N , частоты f , характеристики сопротивления материалов $R(\sigma_T, \sigma_b, \sigma_{д.п.})$, деформации e , дефекты l . В качестве допустимых с использованием уравнений (1)–(8) обосновываются параметры $[N]$, $[P]$, $[l]$ с соответствующими заданными запасами n . По комплексу расчетных и эксплуатационных исследований составляется заключение о прочности, долговечности, ресурсе, живучести и безопасности.



Блок-схема анализа прочности и безопасности машин и конструкций.

На стадии изготовления решаются вопросы выбора, обоснования и развития технологий материалов и контроля. Для изготовленных элементов, систем и объектов в целом устанавливаются исходные состояния: фактические механические свойства и их отклонения от технических требований, уровень реальной дефектности несущих узлов, геометрические формы и их отклонения. Уточненные данные контроля заносятся в паспорта и память

ЭВМ. Все эти данные являются исходной информацией о характеристиках прочности $R_m(\sigma_b)$, $R_f(S_{от})$, деформативности A (удлинении δ), Z (сужении ψ), деформациях e , температуре t , скорости роста трещин dl/dN (или $dl/d\tau$). На их основе уточняются проектные параметры прочности, долговечности, ресурса, живучести и безопасности.

Стадия испытаний включает их различные виды и комбинации: автономное испытание (АИ) узлов, стендовые испытания узлов, агрегатов и изделий, огневые и имитационные испытания. Завершающими оказываются штатные испытания головных образцов с воспроизведением реальных эксплуатационных и экстремальных режимов.

С использованием тех же критериев, что и для стадий проектирования и изготовления, дополнительно уточняются допустимые предельные нагрузки $[P]$ и долговечность $[N]$ или $[\tau]$. На этой основе составляется заключение о ресурсе, методах последующего контроля и назначаются уточненные режимы эксплуатации.

Для стадии ввода в эксплуатацию осуществляются предпусковые и пусковые испытания (холодная и горячая обкатка), физический пуск (с корректировкой всех систем поддержания эксплуатации) и ввод в эксплуатацию. При этом назначается и уточняется система штатной диагностики основных параметров: нагрузок P , температур T , циклов N , частот f , дефектов I (с использованием преимущественно штатных систем ультразвуковой диагностики (УЗД)). Для объектов высокой потенциальной опасности разрабатываются, создаются и применяются методы и системы оперативной диагностики аварийных ситуаций (с использованием тензотермометрии, акустической эмиссии (АЭ), термовидения (ТВ), импульсной голографии (ИМГОЛ)). Получаемые при этом данные могут давать исходную информацию для включения систем автоматической защиты (САЗ) и систем автоматической оперативной защиты (САОЗ).

Таким образом, на начальной стадии эксплуатации получаем важнейшую информацию для подтверждения или корректировки проектных решений о прочности, долговечности, ресурсе живучести и безопасности. По мере исчерпания уточненного проектного ресурса оценивается остаточный ресурс безопасной эксплуатации. С целью согласования всей информации для всех стадий жизненного цикла объекта должны использоваться унифицированные критерии и компьютерные программы. При этом данные о ресурсе могут выводиться на блочные щиты управления (БЩУ) и бортовые счетчики ресурса (БСР) – n_i / N .

Применительно к стадии эксплуатации важным научно-техническим и экономическим вопросам становится вопрос о безопасном выводе объектов из эксплуатации (особенно в случаях накопленных остаточных радиоактивных излучений Φ , химических воздействий, рабочих и аварийных воздействий на объекты, персонал и окружающую среду).

Одной из важнейших задач при решении проблем обеспечения прочности, ресурса и безопасности современных мощных установок и машин всегда являлось определение напряженно-деформированных состояний (НДС) несущих элементов конструкций при эксплуатации [1, 6, 9–12, 16–18].

Для решения указанных задач наряду с современными расчетными методами с использованием ЭВМ успешно применяются эффективные методы экспериментальной механики на всех основных этапах создания машин (рисунок), включая стадии проектирования, доводки опытных образцов, и, особенно, в реальных условиях эксплуатации. В ряде случаев при сложностях в проведении прямых экспериментальных исследований уникальных конструкций применяются комбинированные расчетно-экспериментальные методы, сочетающие преимущества каждого из используемых методов на различных этапах исследований, что обеспечивает получение необходимой информации по НДС, в том числе в зонах, недоступных для измерений [10]. Проведение экспериментальных исследований НДС конструкций атомного, термоядерного, теплоэнергетического, химического и другого оборудования потребовало значительного развития существовавших методов измерений и создания новых, обеспечивающих выполнение модельных, стендовых и натурных исследований на всех этапах создания машин и конструкций (таблица).

Для этого были созданы методы и средства высокотемпературной натурной тензо-, термо- и виброметрии для исследований напряженного состояния высокорисковых объектов с применением разработанных специальных информационно-измерительных комплексов и проведены впервые в отечественной практике исследования при стендовых, заводских и пусковых испытаниях, а также при длительных испытаниях в экстремальных условиях эксплуатации. При этом основные возможности и достижения применяемого метода натурной тензометрии атомного, термоядерного, теплоэнергетического и ракетно-космического оборудования обеспечивают:

возможность тензометрических исследований статических, квазистатических, динамических деформаций (напряжений) в условиях высоких (до 550°C) и низких (до -296°C) температур;

в режиме стационарного и резкостационарного изменения температур (со скоростью $V_t = 5-10^{\circ}\text{C} \cdot \text{c}^{-1}$);

при установке первичных преобразователей на внутренней поверхности корпусных узлов с выводом коммуникационных линий через специальные гермовыводы, при внутреннем давлении (20–30 МПа) и пульсации давления ($p_{\min} = 0,002$ МПа);

при потоках теплоносителя (газового, пароводяного, жидкометаллического) со скоростью 50–300 м/с и более;

при воздействии радиации до флюенса $\Phi_{th} = 7,7 \cdot 10^{19}$ нейтрон/см⁻² (реакторы ВВЭР-440; ВВЭР-1000) и сильных магнитных полей с магнитной индукцией до 20 Тл (термоядерные установки Т-10 и Т-15).

Длительность исследований во многом зависит от реального ресурса стабильной работы первичных преобразователей в условиях эксплуатации и, например, при исследованиях ВВЭР-1000 в условиях эксплуатации на АЭС при $t = 300-350^{\circ}\text{C}$ составила около 1 года при общей длительности исследования одного объекта до 7 лет.

Разработаны и применяются несколько новых типов хрупких тензочувствительных покрытий, предназначенных для различных условий испы-

таний конструкций: канифольные покрытия газопламенного нанесения и наносимые без нагрева, оксидные и стеклоэмалевые покрытия с тензочувствительностью по деформациям, регулируемой в пределах 0,1–0,4%, обладающие стабильностью и обеспечивающие количественные изменения с погрешностью 10–20%. Покрытия получили эффективное использование при исследованиях напряженного состояния на поверхности деталей и узлов конструкций при статической и динамической нагрузках, измерениях в экстремальных условиях низких и высоких температур в диапазоне от –250 до +400°С, а также в различных средах (вода, масло, жидкий водород, азот и др.) и широко используются при проектировании и испытаниях конструкций различного назначения (узлы самолетных и турбинных конструкций, реакторов, ракетных двигателей).

Схема методов и целей исследований

Этап работы	Объект исследования	Метод исследования	Задача (цель) исследований
Эскизный проект	Модели из полимерных материалов	Поляризационно-оптические измерения, тензометрия, хрупкие лаковые покрытия	Обоснование основных конструктивных решений
Технический проект	Модели металлические и из полимерных материалов	То же	Обоснование проекта, уточнение расчета, разработка схемы для стендовой и натурной тензометрии
Рабочий проект	Модели из полимерных материалов	» »	Уточнение формы и размеров деталей, оптимизация конструкций
Изготовление оборудования на заводе	Натурные узлы, модели из полимерных материалов	Натурная тензометрия, хрупкие лаковые покрытия, оптически чувствительные покрытия, дефектоскопия	Проверка допустимости технологических отклонений с уточнением НДС в конструкции, учет повреждений, накопленных при изготовлении
Пуско-наладочные испытания	Натурный объект	Натурная тензометрия, термовиброметрия, дефектоскопия	Тензометрический контроль при режимах пуско-наладочных испытаний, рекомендации по режимам нагружения
Освоение мощности, начальный период эксплуатации	То же	То же	Определение действительной нагруженности, уточнение истории нагружения, текущего и остаточного ресурсов. Рекомендации по оптимизации режимов эксплуатации усовершенствованной конструкции
Эксплуатация, продление ресурса, вывод из эксплуатации	» »	Натурная тензометрия, термовиброметрия, образцовые и безобразцовые испытания, дефектоскопия	Определение нагруженности и повреждаемости. Заключение о прочности и безопасности

Получили развитие и применение разработанные расчетно-экспериментальные методы, позволяющие с решением обратных задач экспериментальной механики расширить объем информации о действительном напряженном состоянии натуральных объектов в условиях эксплуатации, упростить постановку и объем экспериментальных исследований, дать объективную оценку уровня напряженности в неудобных для измерений участках поверхности, особенно на внутренних зонах корпусов и патрубков атомного и теплоэнергетического оборудования.

Полученные в ИМАШ РАН и ИПП НАН Украины совместно с НИИ и КБ отраслей результаты теоретических и экспериментальных исследований деформаций и напряжений в несущих элементах высокорисковых объектов гражданского и оборонного комплексов явились основой для анализа прочности, ресурса и безопасности с применением нормативных и уточненных методов, а также позволяли и позволяют устанавливать, определять, назначать и продлевать проектный, фактический, исходный и остаточный ресурсы безопасной эксплуатации.

Резюме

Розглядається еволюція підходів до вирішення проблем динаміки і міцності машин на основі визначення статичних і динамічних номінальних та локальних напружень від експлуатаційних навантажень. Показано, як в якості обґрунтованих критерійних параметрів деформаційності та міцності конструкційних матеріалів послідовно використовувались характеристики міцності й пластичності матеріалу, характеристики циклічної міцності в області звичайної і малоциклової втоми, характеристики високотемпературної тривалої міцності та повзучесті, а також характеристики лінійної і нелінійної механіки руйнування.

Особливу увагу приділено результатам досліджень безпеки машин і механіки руйнувань. При цьому розглядаються комплексні підходи до вирішення проблем міцності та безпеки потенційно небезпечних об'єктів (атомні електростанції, ракетно-космічні комплекси, літальні апарати, хімічні виробництва та ін.) на основі аналізу всіх стадій їх життєвого циклу, включаючи проектування, виготовлення, випробовування й експлуатацію.

1. Писаренко Г. С., Квитка А. Л., Козлов И. А. и др. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях. – Киев: Наук. думка, 1980. – Т. 1. – 536 с.; Т. 2. – 772 с.
2. Серенсен С. В. Избранные труды. – Киев: Наук. думка, 1985. – Т. 1. – 262 с.; Т. 2. – 256 с.; Т. 3. – 232 с.
3. Ужик Г. В. Сопротивление отрыву и прочность металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 255 с.
4. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович В. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.

5. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 273 с.
6. Пригоровский Н. И. и др. Напряжения и деформации в деталях и узлах машин. – М.: Машиностроение, 1961. – 563 с.
7. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 572 с.
8. Махутов Н. А., Воробьев А. З., Гаденин М. М. и др. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1983. – 270 с.
9. Пригоровский Н. И. и др. Напряжения и деформации в деталях и узлах машин. – М.: Машиностроение, 1961. – 563 с.
10. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
11. Махутов Н. А., Стекольников В. В., Фролов К. В. и др. Конструкции и методы расчета водо-водяных энергетических реакторов. – М.: Наука, 1987. – 231 с.
12. Махутов Н. А., Стекольников В. В., Фролов К. В. и др. Прочность и ресурс водо-водяных энергетических реакторов. – М.: Наука, 1988. – 310 с.
13. Проблемы разрушения, ресурса и безопасности технических систем. – Красноярск: Кодас, 1997. – 519 с.
14. ГНТИ “Безопасность”. Концепция и итоги работы 1991 – 1992 гг. Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ, 1993. – Т. 1. – 350 с.; Т. 2. – 470 с.
15. Безопасность России. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. – М.: МГФ “Знание”, 1999. – Т. 1. – 444 с.; Т. 2. – 410 с.
16. Дайчик М. Л., Пригоровский Н. И., Хуришудов Г. Х. Методы и средства натурной тензометрии: Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
17. Махутов Н. А., Фролов К. В., Стекольников В. В. и др. Экспериментальные исследования деформаций и напряжений в водо-водяных энергетических реакторах. – М.: Наука, 1990. – 296 с.
18. Митенков Ф. М., Стекольников В. В., Махутов Н. А. и др. Тензометрические исследования конструкций энергетического оборудования // Пробл. машиностр. и автомат. – 1988. – Вып. 22. – С. 33 – 43.

Поступила 29. 06. 2000