



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ, РЕСУРСА И ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКЦИЙ

Академик РАН **К. В. ФРОЛОВ**, чл.-кор. РАН **Н. А. МАХУТОВ**, **М. М. ГАДЕНИН**, канд. техн. наук  
(Ин-т машиноведения им. А. А. Благодирова РАН, г. Москва, РФ)

Изложены основы методов и систем определения характеристик прочности, ресурса, живучести и безопасности сложных технических систем при комбинированном воздействии эксплуатационных поражающих факторов. При построении систем анализа и мониторинга штатных и аварийных ситуаций предложено учитывать конструктивные, технологические и эксплуатационные параметры форм, размеров, материалов, способов изготовления, контроля и режимов работы несущих элементов высокорисковых объектов. Важен также учет влияния широкого использования сварки при создании этих объектов.

*Ключевые слова:* технические системы, прочность, ресурс, живучесть, поражающие факторы, системы анализа, мониторинг, обобщенные модели

Целью развития исследований методов и систем по определению прочности, ресурса и живучести является создание основ теории катастроф и рисков в техногенной сфере, новых принципов, технологий и технических комплексов, образующих системы штатной и оперативной диагностики и мониторинга нормальных, аварийных и катастрофических ситуаций с наиболее тяжелыми последствиями [1–32]. Эти ситуации в рамках сложившихся нормативных подходов и методов, как правило, оставались наименее исследованными с научной и прикладной точек зрения в силу своей сложности, малой предсказуемости и повторяемости [1–5].

Решение поставленной задачи включает создание обобщенных математических и физических моделей сложных технологических, рабочих и аварийных процессов в технических системах для анализа условий перехода от штатных состояний к условиям возникновения и развития аварий и катастроф. Такие модели характеризуются многоуровневой структурой, затрагивающей глобальные, локальные и объектовые аспекты безопасности. Разработки имеют междисциплинарный характер и лежат в основе нормирования безопасности и рисков. Принципиально важное значение при этом имеет то обстоятельство, что инициирование аварий и катастроф часто связывается с зонами сварки и наплавов.

Фундаментальные и основополагающие разработки по теории катастроф и безопасности, научным основам техники и технологий, развитию методов экспериментальной механики машин и конструкций предназначены для использования при анализе возникновения и развития аварийных ситуаций. Они получили свое отражение в опубликованных статьях и докладах журнала «Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях» и в ряде томов серии «Безопасность России» [1, 2, 7, 10, 11].

Теория, техника и технологии предупреждения и предотвращения аварий и катастроф наряду с моделированием включают анализ новых предельных состояний при наиболее сложных сценариях развития аварийных ситуаций с учетом первичных и вторичных факторов повреждений в основном металле, металле швов и наплавов, развитие методов и создание систем оперативной диагностики аварийных ситуаций и поврежденных состояний технических систем в случае возникновения техногенных и природных аварий и катастроф, имеющих глобальный, национальный, региональный, местный и объектовый характер.

Если учесть, что потери от крупных аварий и катастроф [1–4, 7–12] постоянно возрастают, то априори можно предположить, что фактически в отечественной и международной практике пока отсутствуют как общепринятые методы анализа, расчетов и моделирования аварий и катастроф, так и нормативная количественная база для обеспечения живучести и безопасности при комбинированных воздействиях поражающих факторов. Это обстоятельство можно объяснить тем, что в целом усложнение создаваемых технических объектов и условий их работы шло существенно быстрее, чем исследование и нормирование их работоспособности. При этом государственные, межведомственные и ведомственные экспертизы крупнейших аварий и катастроф зачастую обнаруживали несоответствие их тяжести, причин, условий и характеристик реально существующей нормативной основе проектирования, изготовления и эксплуатации сложных и потенциально опасных технических систем.

**Основы поэтапного анализа прочности и безопасности.** Формирование направлений развития нормирования, определяющего работоспособность и безопасность сложных технических систем (СТС), шло по линии уточнения и усложнения применяемых методов и критериев [5, 6, 13–32]. При этом сами аварии и катастрофы служили исходной информационной базой (как элементом обратной связи) для такого развития нормативных материалов.

В целом при традиционном решении проблемы безопасности используют три подхода (рис. 1):

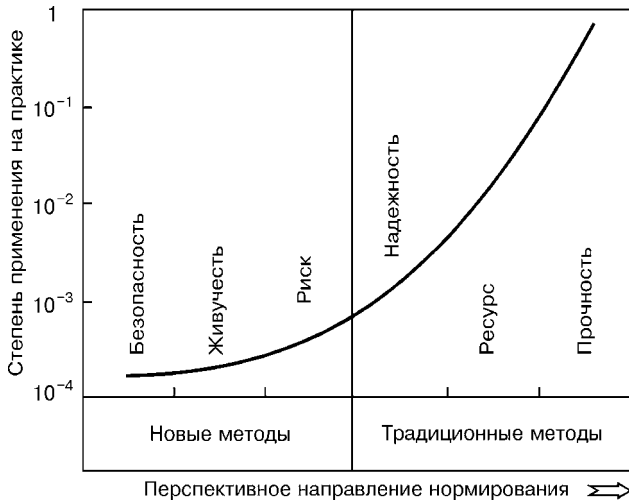


Рис. 1. Структура и развитие методов нормирования

- с позиций прочности (в ее многокритериальном выражении через напряжения  $\sigma$ );
- с позиций ресурса (во временной  $\tau$  и цикловой  $N$  постановках);
- с позиций надежности (в многофакторном вероятностном  $P$  представлении).

В большинстве случаев техногенные аварии и катастрофы сопровождались разрушениями несущих элементов потенциально опасных объектов (независимо от причин и источников такого разрушения). Это привело к тому, что наиболее сложившейся на протяжении десятилетий и столетий стала практика первоочередного обоснования прочности создаваемых объектов. Традиционные методы обоснования прочности базировались на комплексе ставших стандартными характеристик и критериев разрушения ( $\sigma_T, \sigma_B, \sigma_{-1}, \sigma_{д.п}$ ). На основе параметров прочности и разрушения сформированы представления о запасах прочности ( $n_\sigma, n_N,$

$n_\tau$ ), вошедшие в справочную, учебную и нормативную литературу. На сегодня сложилась целая система критериев и запасов прочности, гарантирующая неразрушение объектов при соблюдении заданных условий эксплуатации. Для сварных конструкций в этих расчетах учитывали особенности напряженно-деформированных состояний, критериев прочности и ресурса в потенциально опасных зонах сварки. Однако в этих традиционных структурах и нормативных материалах часто не содержались прямые данные, количественно определяющие ресурс и живучесть СТС. В последние десятилетия этот пробел был восполнен, и в сферу традиционного анализа работоспособности объектов вошли теория и критерии ресурса и надежности, а потом живучести и безопасности [1–6, 13–32].

Более ориентированными на количественное решение проблемы безопасности сложных объектов, создающих крупные аварии и катастрофы, являются новые методы и критерии следующих групп:

- риск (в вероятностно-экономической постановке);
- живучесть (способность и устойчивость функционирования при возникновении недопустимых нормами повреждений на различных стадиях развития аварий и катастроф);
- безопасность (с учетом критериев и характеристик аварий и катастроф).

Вместе с тем объем и степень оценки нормирования и расчета новых характеристик безопасности в реальной инженерной практике для крупных аварий, национальных и глобальных катастроф даже в последнее время остаются чрезвычайно малыми — менее 0,1 % (рис. 2). Особенно это характерно для уникальных военных и гражданских объектов, изготавливаемых с применением различных технологий сварки и наплавки. Таким образом, задача сводится к перспективному изменению направления развития нормирования (рис. 1) — от основополагающего анализа безопасности, живучести и риска к традиционному определению надежности, ресурса и прочности.

Создание методов и систем определения базовых параметров по всей цепочке «прочность — безопасность» должно выстраиваться применительно к следующей приоритетности анализа аварийных и катастрофических ситуаций в техногенной сфере (по степени и возможности их реализации):

- гипотетические, которые могут возникать при непредсказуемых заранее вариантах и сценариях развития с максимально возможными ущербами и жертвами (защищенность от них низкая и прямому восстановлению объекты не подлежат, возможности аварийной диагностики и мониторинга сводятся к определению предвестников этих ситуаций и срабатыванию систем аварийного оповещения);
- запроектные, возникающие при необратимых повреждениях ответственных

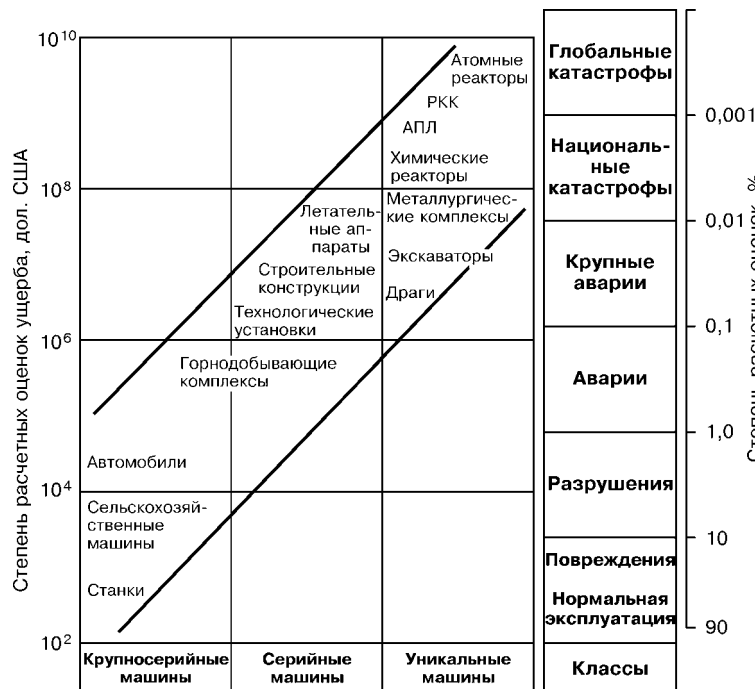


Рис. 2. Распределение экономических потерь от необеспеченности надежности и безопасности различных типов машин



элементов с высокими ущербами и человеческими жертвами (степень защищенности от них недостаточная, необходимость проведения в последующем восстановительных работ, возможность аварийной диагностики и мониторинга в дополнение к гипотетическим прогнозам должны предусматривать включение систем автоматизированной защиты);

— проектные, возникающие при выходе за пределы штатных режимов с предсказуемыми и приемлемыми последствиями (защищенность от них достаточная, должны комбинированно взаимодействовать штатные и аварийные системы диагностики, мониторинга и защиты);

— режимные, возникающие при штатном функционировании потенциально опасных объектов (последствия от них предсказуемые, защищенность от них высокая, преимущественное значение при этом имеют штатные системы диагностики и мониторинга).

Приведенная в работе [12] номенклатура классов аварий и катастроф, типов аварийных и катастрофических ситуаций и уровней потенциальной опасности СТС указывает на большую научную и практическую необходимость их обоснованного ранжирования для решения проблем снижения рисков аварий и катастроф в природно-техногенной сфере.

**Формирование общих принципов и требований к анализу прочности и безопасности.** Определение прочности, ресурса и живучести в теории, технике и технологиях предупреждения и предотвращения аварий и катастроф наряду с моделированием включает анализ предельных состояний при наиболее сложных сценариях развития аварийных ситуаций с учетом первичных и вторичных факторов повреждений, развитие методов и создание систем оперативной диагностики аварийных ситуаций и поврежденных состояний, в том числе со сварными элементами конструкций. При этом для техногенной сферы факторами, инициирующими аварии и катастрофы, могут быть природные опасности, техногенные угрозы и все возрастающая роль человеческого фактора.

Научное направление фундаментальных и прикладных исследований по проблемам определения и повышения прочности, ресурса, живучести и безопасности машин с учетом сложных эффектов нелинейности сформировалось [1, 5, 12, 13] в последние годы на базе многочисленных научно-исследовательских работ, выполненных на протяжении многих десятилетий [5, 12–32].

Существенная роль в развитии исследований по нелинейной механике деформирования и разрушения (рис. 3) как научной основы обоснования исходной прочности, ресурса, живучести и безопасности принадлежит постоянно взаимодейству-



Рис. 3. Этапы развития исследований по прочности и безопасности

ющим научным центрам и школам — академическим, отраслевым, вузовским [13–32]. В значительной степени основные разработки относились к первой стадии жизненного цикла объектов — стадии проектирования, учитывающего технологическую наследственность и условия эксплуатации.

На первых этапах решение линейных задач теории упругости, теории колебаний, теории пластин и оболочек сводилось к определению статических и динамических номинальных и локальных напряжений  $\sigma^3$  от эксплуатационных нагрузок  $P^3$ . В качестве критериальных параметров исходной деформативности и прочности конструкционных материалов использовали модуль упругости  $E$ , пределы текучести  $\sigma_T$  и прочности  $\sigma_B$

$$\sigma^j = f(P^j) \leq \left[ \frac{\sigma_T}{n_T}, \frac{\sigma_B}{n_B} \right], \quad (1)$$

где  $n_T, n_B$  — соответствующие коэффициенты запаса.

С учетом того, что сварные соединения в несущих элементах создавали с учетом их равнопрочности с элементами из основного металла, прямого отражения особенности сварки в уравнении



(1) не находили. Данное уравнение используется при создании автомобилей, сельскохозяйственной техники, энергетического и технологического оборудования, объектов строительных конструкций широкого применения.

В военные и первые послевоенные годы были поставлены исследования по усталости и долговечности. К основным параметрам эксплуатационной нагруженности были отнесены напряжения  $\sigma^y$  и количество циклов нагружения  $N^y$ . В дополнение к уравнению (1) сформулированы условия исходной циклической прочности

$$\sigma_a^{y'} = f(P^y, N^y) \leq \left\{ \frac{\sigma_{-1}}{n_\sigma (K_\sigma \sigma_a^{y'}) \epsilon_\sigma + \psi_\sigma \sigma_m^{y'}} \right\}, \quad (2)$$

где  $\sigma_a^{y'}$ ,  $\sigma_m^{y'}$  — амплитуда и среднее напряжение цикла;  $\sigma_{-1}$  — предел выносливости конструкционного материала;  $K_\sigma$ ,  $\epsilon_\sigma$ ,  $\psi_\sigma$  — характеристики чувствительности материала соответственно к концентрации напряжений, абсолютным размерам и асимметрии цикла.

Для сварных соединений в расчет вводили значения  $\sigma_{-1}$  для различных зон сварки, а остаточные напряжения от сварки изменяли значение средних напряжений  $\sigma_m^{y'}$ . По уравнениям (1) и (2) рассчитывали прочность и долговечность несущих узлов в авиации, на транспорте, в гидроэнергетике. Для анализа местных напряжений были развиты методы фотоупругости и тензометрии.

Освоение районов Сибири и Севера, а также создание объектов криогенной техники в 1950–1960 гг. выдвинуло задачу об исследовании низкотемпературной прочности с определением характеристик хладноломкости. В анализ исходной прочности дополнительно были введены характеристики низкотемпературного локального сопротивления отрыву  $S_K$

$$\sigma_a^{y'} = f(P^y, t^y) \leq \left\{ \frac{S_K}{n_s K_\sigma} \right\}, \quad (3)$$

где  $K_\sigma$  — коэффициент концентрации напряжений с учетом перераспределения напряжений за счет местных пластических деформаций.

Важное значение имело изучение локальных структурных физико-механических процессов формирования микродеформаций и микроповреждений в материале с использованием методов рентгенографии и микроскопии.

Для интенсивно развивавшихся в 1960-е г. отраслей авиационного, энергетического и нефтехимического машиностроения были поставлены систематические исследования по малоцикловой усталости. Создание в зонах действия концентрации и температурных напряжений областей неупругого циклического деформирования потребовало перехода от расчетов в локальных напряжениях к расчетам в локальных деформациях

$$\left\{ \sigma^y, e^y, N^y \right\} = f(P^y, N^y, t^y, m) \leq \left\{ \left[ \left( \frac{\sigma_k}{n_\sigma} \right) \left( \frac{e_k}{n_e} \right) \left( \frac{N_k}{n_N} \right) \right] f(\sigma_\tau, \sigma_b, \psi_k, m_p, m_e) \right\}, \quad (4)$$

где  $\sigma_k$ ,  $e_k$ ,  $N_k$  — критические напряжения, деформации и количество циклов ( $\sigma_k = S_K$ ,  $e_k = 1/(1 - \psi_k)$ );  $m$  — характеристика упрочнения в упругопластической области;  $\psi_k$  — сужение при однократном разрушении;  $m_p$ ,  $m_e$  — характеристики кривой малоциклового разрушения.

Для зон сварки и наплавов в расчет вводили локальные характеристики прочности  $\sigma_\tau$ ,  $\sigma_b$  и пластичности  $\psi_k$ . Остаточные напряжения от сварки и наплавки в сочетании с разнородностью механических свойств швов создавали объемные напряженные состояния, изменяя пластичность в зоне разрушения и приводя к эффекту контактного упрочнения. Для определения  $\sigma^y$ ,  $e^y$  были развиты методы фотоупругих наклеек, муара, малобазных сеток и малобазной тензометрии.

Применительно к новым задачам ракетно-космической техники, стартовых комплексов, сверхзвуковой авиации, теплоэнергетики, нефтехимии, металлургии были поставлены исследования по ползучести, высокотемпературной кратковременной, длительной и циклической (до 500... 3000 °С) прочности, в том числе при программных и двухчастотных режимах нагружения. К уравнениям (1), (2) и (4) при расчетах деталей машин были добавлены уравнения исходной длительной (по времени эксплуатации  $\tau^y$ ) прочности  $\sigma_{д.п}^\tau$

$$\left\{ \sigma^y, e^y, \tau^y, N^y \right\} = f(P^y, \tau^y, N^y, t^y) \leq \left\{ \left[ \left( \frac{\sigma_{д.п}^\tau}{n_\sigma} \right) \left( \frac{e_k^\tau}{n_e} \right) \left( \frac{\tau_k}{n_\tau} \right) \left( \frac{N_k}{n_N} \right) \right] f(m_\tau) \right\}, \quad (5)$$

где  $n_\tau$  — запас по времени  $\tau$ ;  $m_\tau$  — характеристика кривой длительной прочности.

Для зон сварки и наплавов предполагали, что высокие температуры создают релаксацию остаточных напряжений и изменяют локальные механические свойства. Измерения локальных напряжений и деформаций выполняли высокотемпературными методами тензометрии и муара на различных технических объектах.

Развитие и обобщение большого цикла работ по прочности и долговечности в 1960–1970-е гг. привело к формированию одного из важных разделов проектирования, изготовления и эксплуатации машин — обеспечению их надежности и ресурса. Это в первую очередь относилось к изделиям авиационного и общего машиностроения, работающим при переменных режимах термоциклического нагружения. В расчет по кривым усталости  $\sigma - N$  уравнений (1) и (2) вводятся коэффициенты вариации эксплуатационной нагруженности  $v_\sigma$ , пределов выносливости  $v_{\sigma_a}$ , а также конструкторско-технологических факторов ( $K_\sigma$ ,  $\epsilon_\sigma$ ,  $\psi_\sigma$ ). Эти подходы в дальнейшем были распространены и на исходную малоцикловую усталость.



В конце 1960 — начале 1970-х гг. большое внимание уделялось развитию линейной и нелинейной механики статического, циклического и динамического разрушения. При этом расчеты трещиностойкости машиц стали базироваться на местных напряжениях  $\sigma^y$  и деформациях  $e^y$ , на учете размеров дефектов  $l^y$ , коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$  и деформаций  $K_{Ie}$ , температурных условий нагружения  $t^y$

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

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

Уравнение (6) получило нормативное применение в расчетах исходной прочности атомных реакторов, сосудов давления, трубопроводов. При этом для сварных соединений и наплавов характеристики  $\sigma_k, e_k, K_{Ic}$  и  $K_{Ie}$  определяли на специальных образцах, исходные трещины в которых размещались в швах и переходных зонах. При этом трещины создавали существенное перераспределение остаточных напряжений и изменение коэффициентов интенсивности  $K_I$ . Особый интерес в экспериментальной механике для сварных соединений конструкций имело физическое моделирование полей активных и остаточных напряжений в вершине развивающихся трещин (методами фотоупругости, голографии, тензометрии, рентгенографии).

На базе ранее выполненных комплексных исследований с учетом новых задач в области авиационной техники, ракетостроения, атомной и термоядерной энергетики получили развитие методы анализа исходной прочности, ресурса в характеристиках трещиностойкости и живучести машин с учетом повреждений технологического и эксплуатационного происхождения. В последнем случае речь шла и об остаточных прочности и ресурсе.

К уравнениям (1)–(6) были добавлены уравнения для оценки исходного и остаточного ресурса с учетом длительного статического и циклического развития трещин в несущих конструкциях

$$\{\sigma^y, e^y, K_{Ie}^y, N^y, \tau^y, t^y\} = f(P^y, t^y, l^y) \leq \left\{ \frac{\sigma_k}{n_\sigma}, \frac{e_k}{n_e}, \frac{N_k}{n_N}, \frac{\tau_k}{n_\tau}, \frac{t_k}{n_t}, \frac{l_k}{n_l} \right\}, \quad (7)$$

где  $n_N, n_\tau, n_t, n_l$  — соответственно запасы по количеству циклов, времени, температурам и размерам трещин.

Расчетные характеристики  $N_k$  и  $\tau_k$  определяются путем интегрирования кинетических диаграмм разрушения

$$\{N_k, \tau_k\} = F \left\{ (\Delta K_{I1}^y, \Delta K_{Ie}^y), \left( \frac{dl^y}{dN}, \frac{dl^y}{d\tau} \right) \right\}, \quad (8)$$

где  $\Delta K_{I1}^y, \Delta K_{Ie}^y$  — размахи коэффициентов интенсивности напряжений и деформаций.

Для анализа процессов повреждения в основном металле и сварных соединениях были использо-

ваны методы импульсной голографии, термовидения, тензочувствительных покрытий, рентгенографии, микроструктурного анализа, виброметрии.

Результаты исследований, подтверждающие обоснованность уравнений (1)–(8), отражены в соответствующих фундаментальных работах [5, 13–32].

В последнее десятилетие поставлены и начаты исследования живучести и безопасности машин и по механике катастроф. Применительно к потенциально опасным объектам с учетом комплексов повреждающих факторов эти разработки включают расчетно-экспериментальные исследования по всем перечисленным выше направлениям с применением аналитических, численных и экспериментальных методов анализа напряженно-деформированных и предельных состояний для установления исходных и остаточных параметров работоспособности. Актуальность проблемы определения остаточной прочности и ресурса, а также проблем продления ресурса стала очевидной для наиболее сложных и потенциально опасных объектов атомной и тепловой энергетики, ракетно-космической и авиационной техники, объектов нефтегазового комплекса, транспортных систем. Их особенность состоит в сложности, а в ряде случаев невозможности замещения новыми объектами с исходными параметрами прочности и ресурса. Наличие зон сварки и наплавов при этом чрезвычайно усложняет уточненную оценку прочности, ресурса и живучести за счет нелинейного перераспределения в них локальных напряжений и деформаций и изменения локальных механических свойств в процессе эксплуатации.

Из данных рис. 1–3 следует, что по мере усложнения объектов повышенного риска в основу технологий предупреждения и предотвращения аварий и катастроф должны быть положены комплексные методы обоснования, поддержания и повышения прочности, ресурса, живучести и в конечном счете безопасности несущих элементов конструкций.

**Развитие методов экспериментальной механики для оценки прочности, ресурса и живучести.** Основными задачами разработок по определению и обоснованию исходной и остаточной прочности, ресурса, живучести и безопасности технических систем являются [1]:

- фундаментальные исследования по механике деформирования и механике катастроф, лежащие в основе создания критериев и методов решения межотраслевых проблем прочности, ресурса, живучести и безопасности СТС с повышенной потенциальной опасностью возникновения техногенных аварийных ситуаций;

- прикладные исследования и разработки инженерных методик, алгоритмов, программ, моделей, стендов, аппаратуры для расчетно-экспериментального обоснования конструкторско-технологических решений при проектировании, создании, эксплуатации и выводе из эксплуатации действующих и принципиально новых высокорисковых машин и конструкций с применением комплексных критериев прочности, ресурса, живучести и безопасности в первую очередь для наиболее нагру-



женных зон (концентрация напряжений, сварные швы, наплавки).

На рис. 4 показана комплексная блок-схема решения проблем предотвращения аварий и катастроф на базе формирования принципов и требований по прочности, ресурсу 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, испытания и эксплуатацию (с вводом и выводом из нее), все типы аварийных ситуаций и поражающих факторов.

Проектирование включает разработку и согласование технического задания (ТЗ) с введением базовых требований по исходной прочности, ресурсу и безопасности. Разработка проекта состоит из ряда стадий (принципиальные схемы, предэскизный, технический и рабочий проекты). На этой стадии разрабатываются физические и математические модели с применением вычислительной техники и систем автоматизированного проектирования (САПР). На стадии проектирования на основании нормативных и дополнительных расчетов проводится анализ прочности и обосновывается исходный ресурс. Основными критериями и характеристиками таких расчетов являются: эксплуатационные нагрузки  $P$ , температура  $t$ , количество

циклов  $N$ , частота  $f$ , характеристики сопротивления материалов  $R(\sigma_T, \sigma_B, \sigma_{д.п.})$ , деформации  $e$ , дефекты  $l$ . В качестве допустимых с использованием уравнений (1)–(8) обосновываются значения  $[N]$ ,  $[P]$ ,  $[l]$  с заданными коэффициентами запасов  $n$ . По комплексу расчетных и эксплуатационных исследований составляется заключение о прочности, долговечности, ресурсе, живучести и безопасности. Таким образом, на стадии проектирования закладываются основы предупреждения и предотвращения аварийных и катастрофических ситуаций.

На стадии подготовки к изготовлению решаются вопросы формирования требований, выбора, обоснования и применения технологий, материалов и контроля. Для изготовленных элементов, систем и объектов в целом устанавливаются исходные состояния в зонах и вне зон сварки: 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 банки данных на ЭВМ. Все эти данные являются исходной информацией о характеристиках прочности  $R_m(\sigma_B)$ ,  $R_f(S_K)$ , деформативности  $\Delta l$  (удлинении),  $\psi$  (сужении), деформациях  $e$ , температуре  $t$ , скорости роста трещин  $dl/dN$  (или  $dl/d\tau$ ). На их основе проводится уточнение проектных параметров исходной прочности, долговечности, ресурса, живучести и безопасности. В соответствии с изложенным на стадии изготовления обеспечиваются основы предупреждения и предотвращения тяжелых аварий и катастроф для реальных объектов с учетом комплекса принятых конструктивно-технологических решений.

Стадия испытаний включает различные их 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, проводится дополнительное уточнение допустимых предельных нагрузок  $[P]$  и долговечности  $[N]$ . На этой основе составляется уточненное заключение об исходном ресурсе, методах последующего контроля и назначаются уточненные режимы эксплуатации.

Для стадии ввода в эксплуатацию осуществляются предпусковые и пусковые испытания (гидро-, пневмоиспытания, холодная и горячая обкатка), физический пуск (с корректировкой всех систем поддержания эксплуатации) и ввод в эксплуатацию. При этом назначается и уточняется система штатной диагностики

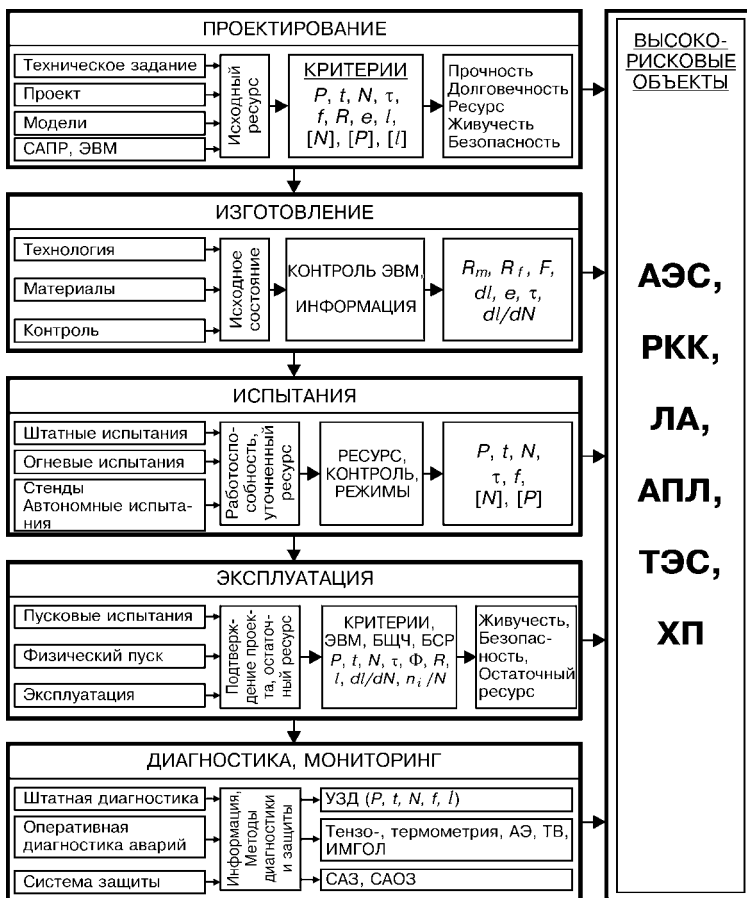


Рис. 4. Блок-схема анализа исходной и остаточной прочности, ресурса и безопасности машин и конструкций



основных параметров: нагрузок  $P$ , температур  $t$ , циклов  $N$ , частот  $f$ , дефектов  $l$  (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 тензо- и термометрии, акустической эмиссии (АЭ), термовидения (ТВ), импульсной голографии (ИМГОЛ). Объем и уровень дефектоскопического контроля, как правило, резко увеличивается в зонах сварных соединений и наплавов. Получаемые при этом данные могут давать исходную информацию для включения систем автоматической защиты (САЗ) и систем автоматической оперативной защиты (САОЗ). По результатам исследований при вводе в эксплуатацию составляется заключение об уточненной исходной прочности и назначенном исходном ресурсе.

На начальной стадии эксплуатации должна быть получена важнейшая информация по подтверждению или корректировке проектных решений о прочности, долговечности, ресурсе, живучести и безопасности. По мере исчерпания уточненного проектного ресурса проводится оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации. Для согласования всей информации для всех стадий жизненного цикла объекта должны использоваться унифицированные критерии и компьютерные программы. При этом данные об исходном, использованном и остаточном ресурсе могут выводиться на блочные щиты управления (БЩУ) и бортовые счетчики ресурса (БСР) —  $n_i/N$ .

По мере исчерпания ресурса на повестку дня выходит проблема оценки живучести, продления ресурса, восстановления и повышения остаточной прочности. Применительно к стадии эксплуатации важным научно-техническим и экономическим вопросом становится вопрос о безопасном выводе объектов из эксплуатации (особенно в случаях накопленных остаточных радиоактивных излучений  $\Phi$ , химических, рабочих и аварийных воздействий на объекты, персонал и окружающую среду).

Возможность предупреждения аварий и катастроф на высокорисковых объектах поддерживается определенным набором конструкторских, технологических и эксплуатационных мероприятий с применением новых методов диагностики несущих элементов в штатных и аварийных условиях функционирования. В общем случае на основе уравнений (1)–(8) могут быть построены пространственные поверхности предельных и допустимых состояний (рис. 5). Координатными осями для этих поверхностей являются:

- ось показателей эксплуатационной нагруженности (усилий  $P$ , номинальных напряжений  $\sigma_n$ , коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$ , приведенных локальных максимальных напряжений  $(\sigma_{пр})_{\max k}$  в зонах концентрации);
- ось температурно-временных и циклических параметров эксплуатации (температура  $t$ , время  $\tau$ , количество циклов нагружения  $N$ );

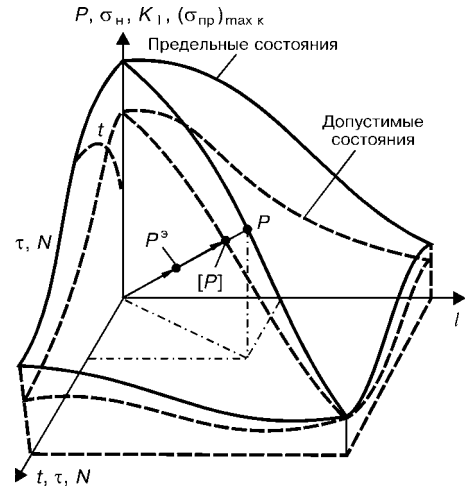


Рис. 5. Схема предельных и допустимых состояний при оценках прочности, ресурса и живучести

— ось состояния дефектности (размеры  $l$  дефектов с учетом их формы и пространственного расположения).

Образование разрушения, недопустимых пластических деформаций или трещин соответствует достижению предельного состояния (поверхности предельных состояний). Предельная нагрузка  $P$  в этом случае является вектором, проходящим через начало координат с углами, соответствующими данному состоянию конструкции (по  $l, t, \tau, N, \sigma_n, K_I, (\sigma_{пр})_{\max k}$ ). Если ввести необходимые запасы  $n$  на основе соотношений (1)–(8), то от поверхности предельных состояний можно перейти к поверхности допустимых состояний и нагрузке  $[P]$ . На этой базе прочность, ресурс и живучесть можно считать обеспеченными, если вектор эксплуатационной нагрузки  $P^0$  будет меньше или равен вектору допустимой нагрузки  $[P]$  —  $(P^0 \leq [P])$ .

Классические (традиционные) методы расчета прочности и ресурса развивались в предположении бездефектного конструкционного материала ( $l = 0$ ). В этом случае от предельных и допустимых поверхностей можно перейти к предельным и допустимым кривым (в плоскости « $P, \sigma_n, K_I, (\sigma_{пр})_{\max k} - t, \tau, N$ ») — статической (при заданной температуре  $t$ ), длительной статической (по заданному времени  $\tau$ ) и циклической (по заданному количеству циклов  $N$ ) прочности. Прочность и живучесть на первых этапах определяли по критериям линейной механики разрушения (статическая трещиностойкость) для плоскости « $P, \sigma_n, K_I, (\sigma_{пр})_{\max k} - l$ ».

Для современных расчетов прочности, ресурса и живучести с использованием предельных и допустимых состояний (рис. 5) становится важным принятие единых уравнений состояния, единых критериев разрушения и единых комплексов расчетных характеристик в уравнениях (1)–(8) независимо от типа конструкции, свойств конструкционных материалов и условий эксплуатационного нагружения. При этом наиболее перспективным является поэтапный переход от расчетов, учитывающих напряжения [5, 13–16] (что принято в большинстве нормативных документов), к расчетам, учитывающим деформацию [17–32].



При развитии и проведении комплексных расчетов на прочность, ресурс и живучесть в детерминированной постановке используют всю исходную информацию об усредненных характеристиках эксплуатационной нагруженности, о средних или гарантированных критериальных характеристиках сопротивления разрушению конструктивных материалов (основной металл, металл швов и наплавов), об усредненных характеристиках исходной дефектности, определяемой по нормам дефектоскопического контроля (преимущественно в местах сварки и наплавов).

Если для стадии проектирования или эксплуатации в расчеты вводят статистические характеристики (функции распределения и их параметры) нагруженности, механических свойств материалов и дефектности деталей, то представляется возможным определить вероятностные исходные характеристики прочности, ресурса и живучести, надежности, риска и безопасности конструкций.

Для уточненных оценок остаточной прочности, ресурса, живучести и безопасности базовые исходные уравнения должны учитывать изменяющиеся в процессе эксплуатации напряжения и предельные состояния с учетом их зависимости от условий эксплуатации — циклов, времени, температур, рабочих сред.

1. *Безопасность* России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. — М.: Знание, 1998. — Раздел 1. — 448 с.; Раздел 2. — 416 с.
2. *Научные основы обеспечения комплексной безопасности России* / Н. А. Махутов, В. И. Осипов, М. М. Гаденин и др. // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. — М.: ВИНТИ. — 2002. — Вып. 5. — С. 15–26.
3. *Воробьев Ю. Л.* Основы формирования и реализации государственной политики в области снижения рисков чрезвычайных ситуаций. — М.: Деловой экспресс, 2002. — 247 с.
4. *Безопасность* России. Безопасность промышленного комплекса. — М.: Знание, ГУП «НТЦ Промышленная безопасность», 2002. — 455 с.
5. *Проблемы* разрушения, ресурса и безопасности технических систем / Под ред. В. В. Москвичева, М. М. Гаденина. — Красноярск: Ассоциация КОДАС-СиБЭРА, 1997. — 520 с.
6. *Прочность, ресурс и безопасность машин и конструкций* / Под ред. Н. А. Махутова, М. М. Гаденина. — М.: ИМАШ РАН, 2000. — 527 с.
7. *Безопасность* России. Безопасность трубопроводного транспорта. — М.: Знание, 2002. — 752 с.
8. *Комплексная безопасность России* — исследования, управление, опыт. — М.: Информиздат, 2002. — 396 с.
9. *Безопасность* России. Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. — М.: Знание, 1999. — 592 с.
10. *Безопасность* России. Экологическая диагностика. — М.: Машиностроение, 2000. — 496 с.
11. *Безопасность* России. Основополагающие государственные документы. — М.: Знание, 1998. — Ч. 1. — 512 с.; Ч. 2. — 496 с.
12. *Катастрофы* и общество. — М.: Контакт-культура, 2000. — 331 с.
13. *Серенсен С. В.* Избранные труды. — Киев: Наук. думка, 1985. — Т. 1. — 262 с.; — Т. 2. — 256 с.; — Т. 3. — 232 с.
14. *Малиновский Б. Н.* Академик Борис Патон: Труд на всю жизнь. — М.: ПЭР СЭ, 2002. — 271 с.
15. *Механическое* поведение материалов при различных видах нагружения / В. Т. Трощенко, А. А. Лебедев, В. А. Стрижало и др. — Киев: ИПП, 2000. — 569 с.
16. *Прочность* при малоцикловом нагружении. Основы методов расчетов и испытаний / С. В. Серенсен, Р. М. Шнейдерович, Н. А. Махутов и др. — М.: Наука, 1975. — 288 с.
17. *Поля* деформаций при малоцикловом нагружении / С. В. Серенсен, Р. М. Шнейдерович, Н. А. Махутов и др. — М.: Наука, 1979. — 278 с.
18. *Гусенков А. П.* Прочность при изотермическом и неизо-термическом малоцикловом нагружении. — М.: Наука, 1979. — 296 с.
19. *Уравнения* состояния при малоцикловом нагружении / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, Д. А. Гохфельд и др. — М.: Наука, 1981. — 245 с.
20. *Прочность* конструкций при малоцикловом нагружении / Н. А. Махутов, А. З. Воробьев, М. М. Гаденин и др. — М.: Наука, 1983. — 271 с.
21. *Механика* малоциклового разрушения / Н. А. Махутов, М. И. Бурак, М. М. Гаденин и др. — М.: Наука, 1986. — 264 с.
22. *Козаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
23. *Романов А. Н.* Разрушение при малоцикловом нагружении. — М.: Наука, 1988. — 280 с.
24. *Статистические* закономерности малоциклового разрушения / Н. А. Махутов, В. В. Зацаринный, М. М. Гаденин и др. — М.: Наука, 1989. — 253 с.
25. *Конструкции* и методы расчета водо-водяных энергетических реакторов / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, В. В. Стекольников, К. В. Фролов и др. — М.: Наука, 1987. — 232 с.
26. *Прочность* и ресурс водо-водяных энергетических реакторов / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, М. М. Гаденин и др. — М.: Наука, 1988. — 312 с.
27. *Экспериментальные* исследования деформаций и напряжений в водо-водяных энергетических реакторах / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, В. В. Стекольников и др. — М.: Наука, 1990. — 296 с.
28. *Конструирование* машин. Справочно-методическое пособие / Под ред. акад. К. В. Фролова. — М.: Машиностроение, 1994. — Т. 1. — 528 с.; Т. 2. — 624 с.
29. *Проблемы* ресурса и безопасности энергетического оборудования / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, М. М. Гаденин и др. — М.: ФЦНТИ ПП «Безопасность» — ИМАШ РАН, 1999. — 286 с.
30. *Махутов Н. А.* Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.
31. *Серенсен С. В., Козаев В. П., Шнейдерович Р. М.* Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. — М.: Машиностроение, 1975. — 488 с.
32. *Модельные* исследования и натурная тензометрия энергетических реакторов / Н. А. Махутов, К. В. Фролов, Ю. Г. Драгунов и др. — М.: Наука, 2001. — 293 с.

Fundamentals and systems of determination of characteristics of strength, service life, survivability and safety of complex technical systems at a combined action of service damaging factors are described. When designing systems of analysis and monitoring of scheduled and emergency situations, it was suggested to take into account the design, technological and service parameters of shapes, sizes, materials, methods of manufacture and control and also conditions of operation of load-carrying elements of highly-hazardous objects. The wide application of welding in the creation of these objects should also be considered.

Поступила в редакцию 12.03.2003