
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.01: 531.8

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ, РЕСУРСА, ЖИВУЧЕСТИ
И БЕЗОПАСНОСТИ МАШИН В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ**© 2020 г. Н. А. Махутов¹, М. М. Гаденин^{1,*}¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия***e-mail: safety@imash.ru*

Поступила в редакцию 15.03.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Показано, что многопараметрическая система оценки прочности, ресурса, живучести и безопасности относится к таким направлениям, как статическая, динамическая и циклическая прочность, трещиностойкость, хладостойкость, коррозионная стойкость. На базе закономерностей деформирования и разрушения и с учетом общей постановки и решения задач фундаментальных и прикладных исследований прочности, ресурса, живучести и безопасности осуществляется построение структур определяющих уравнений и их параметров для расчетных моделей и реальных технических систем с учетом классификации штатных, аварийных и катастрофических ситуаций, а также накапливаемой технологической и эксплуатационной повреждаемости. основополагающими элементами решения проблем безопасной эксплуатации объектов техносферы при сложных режимах их нагруженности являются уравнения состояния, критерии разрушения и критериальная база конструкционного материаловедения, образующие в комплексе многопараметрическую систему оценки прочности, ресурса, живучести и безопасности.

Ключевые слова: прочность, ресурс, живучесть, безопасность, условия нагружения, уравнения состояния, критерии разрушения, материаловедение

DOI: 10.31857/S0235711920040094

Актуальной проблемой для современных машин и конструкций, решаемой в рамках механики деформирования и разрушения и механики катастроф, является комплексность оценки их прочности, ресурса, живучести и безопасности с учетом сложных условий эксплуатационных воздействий [1, 6, 7, 10, 11]. В этой связи важным является анализ и исследование условий и последствий реального процесса накопления повреждений от совместного действия нескольких повреждающих факторов различной интенсивности, например, динамической, длительной статической и повторно статической (малоцикловой) нагруженности, усталости, коррозии, износа, различных физических и химических воздействий [1–5, 8–11].

Знание напряженно-деформированного состояния, основных повреждающих факторов, кинетики повреждений и формирование соответствующих определяющих уравнений состояния позволяет осуществить анализ структуры и условий достижения тех или иных предельных состояний в наиболее нагруженных элементах рассматриваемых технических систем в процессе их эксплуатации. При этом предельные состояния характеризуются определяющими несущую способность критериями прочности, деформативности и живучести, основанными на базовых положениях механики деформируемого твердого тела, а также линейной и нелинейной механики разрушения с применением критериальной базы конструкционного материаловедения [4, 9, 11–14].

Конечной целью применения комплексных расчетно-экспериментальных подходов является решение задачи научно-обоснованной оценки условий безопасной эксплуатации объектов как для штатного их функционирования, так и для случаев возникновения на них критических ситуаций. Системы определяющих уравнений и моделей в анализе предельных состояний таких объектов с повышенными параметрами прочности, ресурса, живучести и безопасности, включают как нормированные (стандартизованные), так и ненормированные методы анализа, расчетные уравнения, характеристики и запасы. При этом особое значение придается углубленному рассмотрению проблем механики деформируемых сред, а также механики, физики и химии катастроф [1, 5–7, 10–15].

Одной из важнейших задач, рассматриваемых в рамках механики катастроф, является анализ условий и последствий комплексного процесса накопления повреждений от совместного действия нескольких повреждающих факторов различной интенсивности, например, динамической, длительной статической и повторно статической (малоцикловой) нагруженности, усталости, коррозии, износа и других видов воздействий. В связи с этим, перспективным при оценке параметров безопасной эксплуатации и защищенности объектов техносферы является обоснование моделей образования и суммирования повреждений в условиях комплексного воздействия повреждающих эксплуатационных факторов, построение системы уравнений состояния с учетом в них кинетики накопления повреждений и критериев достижения предельных состояний [1, 2, 4–13].

Использование различных экспериментальных методов и средств, включающих нагружающие системы, элементы технической диагностики, измерители деформаций и датчики повреждений, позволяет воссоздать на испытательном оборудовании реальную нагруженность технических систем подвижного состава и инфраструктуры и зафиксировать кинетику повреждений материала в процессе испытаний и эксплуатации. В основе методологии применения таких методов и средств лежат механические, физические и химические явления, сопровождающие процесс накопления повреждений [1, 6, 8–11, 14–17].

Непосредственное решение рассматриваемой проблемы комплексного определения безопасных состояний высокорисковых технических объектов и оценки соответствующих условий их безопасной эксплуатации и защищенности от аварий и катастроф состоит из оценки характеристик их прочности и ресурса, а также определения с их учетом рисков и безопасности эксплуатации рассматриваемых конструкций (рис. 1).

Под риском возможного возникновения на объектах техносферы чрезвычайных ситуаций понимается сочетание вероятностей возникновения неблагоприятных процессов и событий в техногенной, природной и социальной среде и сопутствующих им ущербов [1, 6, 7]. Установление вида зависимости рисков $R(\tau)$ от обуславливающих их факторов – вероятности возникновения чрезвычайной ситуации $P(\tau)$ и возможного ущерба при ее реализации $U(\tau)$ (функционала F) является фундаментальной задачей науки о безопасности. При этом введение в рассмотрение допустимых уровней риска $[R(\tau)]$ осуществляется через критические (неприемлемые) риски $R_k(\tau)$ и запасы по величинам рисков n_R

$$R(\tau) = F\{P(\tau), U(\tau)\}, \quad [R(\tau)] = \frac{1}{n_R} R_k(\tau). \quad (1)$$

Для определения безопасных состояний объектов техносферы и оценки соответствующих условий их безопасной эксплуатации и защищенности от аварий и катастроф осуществляется ряд мероприятий, включающих в себя такие этапы, как моделирование исследуемого объекта, разработка его конструкции и технологий изготовления, выбор приемлемых для заданных условий эксплуатации конструкционных материалов с соответствующим набором характеристик механических свойств – пре-

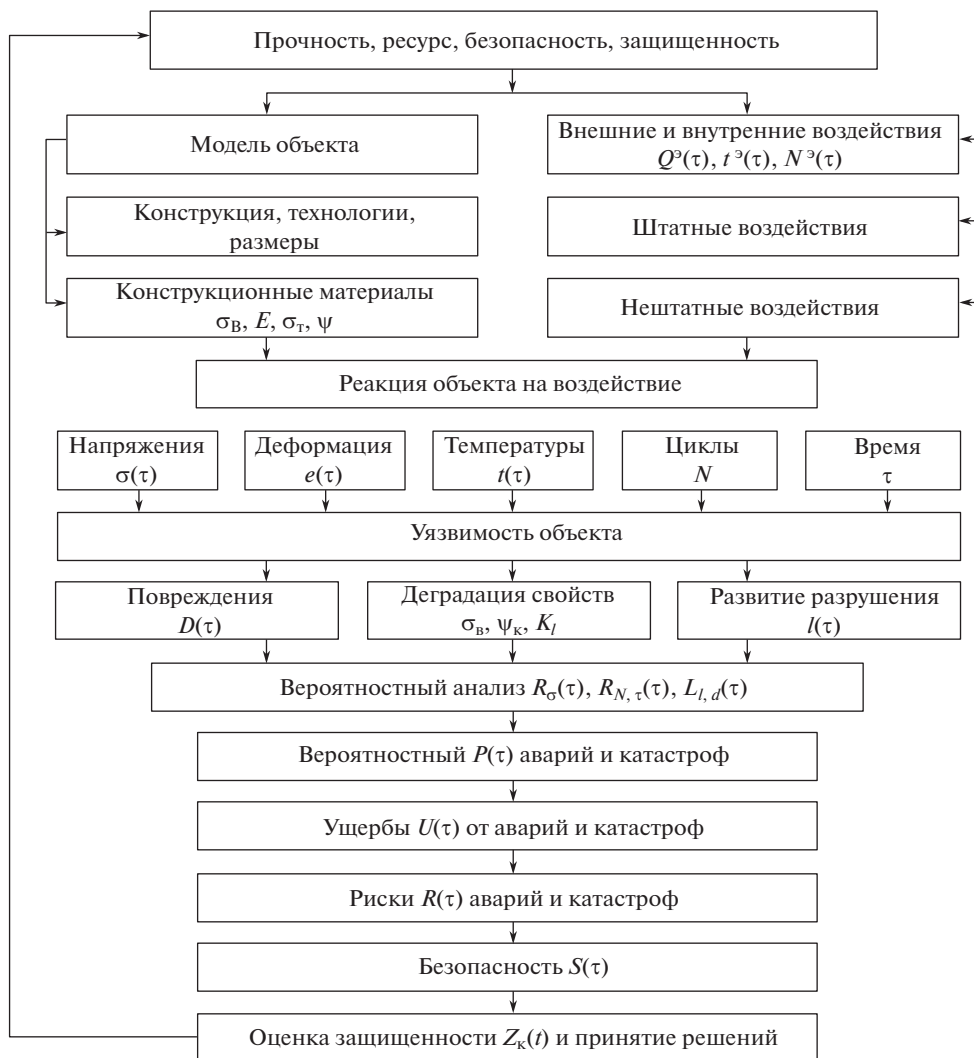


Рис. 1. Структура оценки прочности, ресурса, живучести, безопасности и защищенности высокорисковых технических объектов.

делов текучести σ_t , прочности σ_b и пластичности ψ , модуля упругости E . В таких расчетах для соответствующего времени эксплуатации τ оцениваются и учитываются также внешние и внутренние эксплуатационные воздействия на анализируемый объект (нагрузки $\sigma^3(\tau)$, температуры $I^3(\tau)$, циклы $N^3(\tau)$), задаются параметры штатных и возможных нештатных воздействий в процессе эксплуатации и, как результат, определяются интегральные параметры реакций объекта на комплекс заданных воздействий с учетом его конструктивных особенностей и свойств материала, в том числе с учетом их вероятностной природы [2, 3, 10–14].

В число указанных параметров входят локальные и номинальные напряжения $\sigma(\tau)$ и деформации $\epsilon(\tau)$ в наиболее нагруженных зонах, значения эксплуатационных тем-

ператур $t(\tau)$, чисел циклов N и времени τ нагружения. По этим параметрам через характеристики поврежденности $D(\tau)$, изменения механических свойств материала σ_b , Ψ_k , коэффициента интенсивности напряжений K_I и размеров и расположения развивающихся дефектов $l(\tau)$ определяются уязвимость объекта к возникновению чрезвычайных ситуаций путем определения вероятностных характеристик действующих эксплуатационных параметров, включая распределение напряжений, спектры циклической нагруженности и развития повреждаемости. С учетом перечисленных данных для рассматриваемого объекта определяются вероятности возможного возникновения на нем аварии или катастрофы $P(\tau)$, а также ущерба от их реализации $U(\tau)$ и, как следствие, параметры риска $R(\tau)$, безопасности $S(\tau)$ и защищенности $Z_k(\tau)$ для анализа возможности безопасной эксплуатации [1, 5–11].

В соответствии с выражениями (1) для решения задач снижения рисков $R(\tau)$ до уровней приемлемых $[R(\tau)]$ и обеспечения безопасности $S(\tau)$ и защищенности $Z_k(\tau)$ объектов техносферы важное значение придается рассмотрению следующих этапов: 1) предварительный анализ рисков $R(\tau)$ и безопасности $S(\tau)$; 2) выбор параметров определения и регулирования прочности $R_\sigma(\tau)$, ресурса $R_{N\tau}(\tau)$, надежности P_{PR} , живучести $L_{ld}(\tau)$, безопасности $S(\tau)$ и рисков $R(\tau)$ для всех стадий жизненного цикла объектов; 3) исследование закономерностей деформирования и разрушения в нелинейной постановке для экстремальных условий; 4) построение систем защиты с заданным уровнем защищенности $Z_k(\tau)$ по критериям рисков.

Если уровень достигнутой защищенности $Z_k(\tau)$ оказывается ниже требуемого, проводятся специальные мероприятия по его повышению. Большое значение при этом приобретает точность расчетов, снижение погрешностей диагностики и мониторинга при определении состояний как объектов в целом, так и используемых в них материалов. Структура определения опасных и безопасных состояний при анализе защищенности $Z_k(\tau)$ объектов для стадий проектирования и эксплуатации показана на рис. 2.

Ее основой является то обстоятельство, что возникновение и развитие аварий и катастроф определяется недопустимыми процессами деформирования и разрушения несущих конструкций, за которыми следуют разрушения, взрывы, выбросы опасных веществ, вызывающих в том числе и негативные последствия для окружающей среды.

В соответствии с [1, 6, 7, 11] при создании единых научных основ оценки и нормирования прочности, ресурса, живучести, безопасности и защищенности технических систем должны учитываться степень их опасности, типы возможных аварийных ситуаций и катастроф (нормальные условия эксплуатации, отклонения от нормальных условий эксплуатации, проектные аварии, запроектные аварии, гипотетические аварии), спектр поражающих факторов и комплексная система критериев безопасности как самих объектов, так и связанной с ними среды жизнедеятельности. В указанном направлении на стадии проектирования объектов техносферы проводится анализ их прочности на основании стандартных нормативных и дополнительных уточненных расчетов, и обосновывается исходный ресурс. Базовыми данными для такого анализа являются: эксплуатационные нагрузки и характеристики эксплуатационного нагружения (температуры, время и числа циклов, частоты), характеристики сопротивления материалов нагрузкам, включая пределы текучести, прочности, длительной прочности и усталости $R(\sigma_r, \sigma_b, \sigma_{дп}, \sigma_{-1})$, номинальные и локальные деформации e , размеры дефектов l . По результатам расчетных и эксплуатационных исследований обосновываются допустимые нагрузки $[P]$, дефекты $[l]$ и ресурс $[N]$ с заданными запасами n и составляется заключение о прочности $[R_\sigma(\tau)]$, долговечности $[R_{N\tau}]$, ресурсе $[R_{N\tau}(\tau)]$, живучести $[L_{ld}]$, риске $R(\tau)$, безопасности $S(\tau)$ и защищенности $Z_k(\tau)$.

Наиболее ориентированными на количественное решение проблемы обеспечения безопасности $S(\tau)$ высокорисковых объектов, способных создавать тяжелые аварии и катастрофы, являются современные методы и критерии следующих групп: риск $R(\tau)$ в

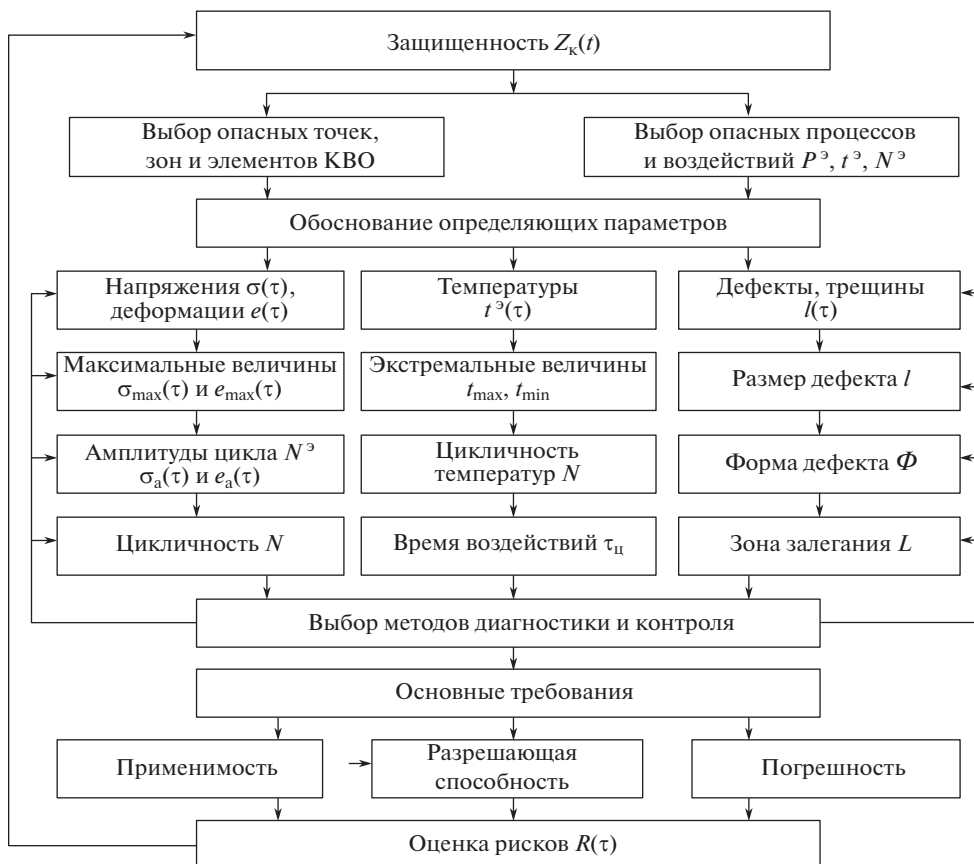


Рис. 2. Структура анализа состояния для обоснования защищенности объектов техносферы.

вероятностно-экономической постановке; живучесть $L_{ld}(\tau)$, определяющая способность и устойчивость функционирования при возникновении повреждений на различных стадиях развития аварий и катастроф; безопасность $S(\tau)$ с учетом критериев риска $R(\tau)$ и характеристик аварий и катастроф. Вместе с тем объем нормирования и расчета характеристик безопасности $S(\tau)$ в реальной инженерной практике даже в последнее время остается чрезвычайно малым. В связи с этим, современная постановка задач и решение проблем защищенности $Z_k(\tau)$ должны сводиться к перспективному изменению направления развития исследований, нормирования и регулирования соответствующих параметров – к изначальному основополагающему анализу защищенности $Z_k(\tau)$, безопасности $S(\tau)$ и риска $R(\tau)$ с последующим определением на их основе надежности $P_{PR}(\tau)$, ресурса $R_{N\tau}(\tau)$ и прочности $R_{\sigma}(\tau)$.

Одной из фундаментальных научных задач, решение которой позволяет объективно обосновать параметры прочности и ресурса машин и конструкций применительно к реальным условиям их эксплуатации, является формирование уравнений состояния конструкционного материала при его статическом и циклическом деформировании в упругой и упругопластической области для сложных режимов изменения статических, мало- и многоцикловых нагрузок и при различных сочетаниях параметров вибрационно-механических и термических воздействий, а также исследование связей между

процессами деформирования и накопления повреждений для определения условий достижения предельных состояний при таких сложных режимах нагружения [1, 2, 5, 8, 10, 11, 13]. Основными путями решения такой задачи являются: анализ режимов внешних и внутренних воздействий и определяющих параметров сложных циклов вибрационно-механических и термических напряжений; установление закономерностей статического и циклического деформирования в зависимости от чисел циклов нагружения; развитие силовых, деформационных и энергетических подходов к формированию критериев предельных состояний в условиях сложных воздействий.

Методология определения ресурса по характеристикам эксплуатационной нагруженности Q_{\max}^3 состоит в том, что в определяющих соотношениях статической прочности

$$\sigma_{n_{\max}}^3 = Q_{\max}^3 \{F, W_{oc}, W_p\} \leq [\sigma_n] = \min \left\{ \frac{\sigma_{\tau}}{n_{\tau}}, \frac{\sigma_{\text{в}}}{n_{\text{в}}} \right\} \quad (2)$$

должно обеспечиваться непревышение максимальных номинальных эксплуатационных напряжений $\sigma_{n_{\max}}^3$ над номинальными допускаемыми напряжениями $[\sigma_n]$. В выражении (2): Q_{\max}^3 – максимальная эксплуатационная нагрузка (осевая сила, изгибающий, крутящий моменты); F – размер площади сечения, W_{oc} – осевой момент сопротивления, W_p – полярный момент сопротивления. Допускаемое номинальное напряжение $[\sigma_n]$ определяется как минимальное по пределу текучести σ_{τ} с запасом n_{τ} , или по пределу прочности $\sigma_{\text{в}}$ с запасом $n_{\text{в}}$.

В стандартных нормативных расчетах все величины, входящие в выражение (2), не зависят от времени τ . В уточненных расчетах статической прочности величины σ_{τ} и $\sigma_{\text{в}}$ принимаются зависящими [11] от времени τ (вследствие деградации металла, старения, коррозии, эрозии, износа)

$$\{\sigma_{\tau}, \sigma_{\text{в}}\} = F_{\tau}(\tau) = \{\sigma_{\tau}(\tau), \sigma_{\text{в}}(\tau)\}. \quad (3)$$

Располагая функциями изменения во времени характеристик $\sigma_{\tau}(\tau)$ и $\sigma_{\text{в}}(\tau)$ в выражении (3) при неизменности других параметрах выражения (2), можно оценить фактический $\tau_{\text{ф}}^3$ и допускаемый $[\tau]$ временной ресурс рассматриваемого элемента при длительном статическом нагружении (рис. 3).

Расчетные значения фактического $\tau_{\text{ф}}^3$ (до разрушения или до образования недопустимых повреждений) или допускаемого $[\tau]$ ресурса определяются выражениями

$$\tau_{\text{ф}}^3 = F_{\tau} \{ \sigma_{n_{\max}}^3, \sigma_{\tau}(\tau), \sigma_{\text{в}}(\tau) \}, \quad [\tau] = F_{\tau} \{ \sigma_{n_{\max}}^3, \sigma_{\tau}(\tau), \sigma_{\text{в}}(\tau), n_{\tau}, n_{\text{в}} \}. \quad (4)$$

Дополнительное изменение ресурса $[\tau]'$ (рис. 3) может быть обусловлено уменьшением в процессе эксплуатации характеристик опасных сечений (F, W_{oc}, W_p) по выражению (2) вследствие коррозии, эрозии, износа и других внешних воздействий. Это может приводить к росту $\sigma_{n_{\max}}^3(\tau)$ при постоянных воздействиях Q_{\max}^3 .

Наряду с максимальными статическими нагрузками, определяющими статическую прочность и длительный статический ресурс по выражениям (4) важное значение для оценки поврежденных и предельных состояний имеют переменные во времени τ эксплуатационные нагрузки $Q^3(\tau)$ и воздействия $V^3(\tau)$, носящие циклический и, зачастую, нерегулярный характер [2, 6, 8, 10, 11]. Базовыми характеристиками переменных эксплуатационных нагрузок являются: максимальные и минимальные значения на-

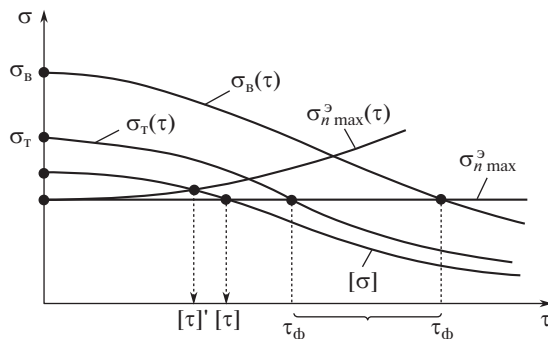


Рис. 3. Схема определения ресурса по характеристикам статической прочности.

грузок Q_{\max}^3 , Q_{\min}^3 и воздействий V_{\max}^3 , V_{\min}^3 ; частота f (скорость) их изменения или время цикла $\tau_{ц}$; общее число циклов N .

Для оценки характеристик ресурса τ_{ϕ}^3 и $[\tau]$ по величинам $Q^3(\tau)$ и $V^3(\tau)$ расчетом или экспериментом устанавливается история эксплуатационной нагруженности во времени τ

$$Q^3(\tau) = F_Q\{V(\tau), Q(\tau)\}. \quad (5)$$

На основе выражения (2) расчетом или экспериментом определяется история изменения во времени τ номинальных эксплуатационных напряжений

$$\sigma_n^3(\tau) = Q^3(\tau)\{F, W_{oc}, W_p\}. \quad (6)$$

По характеристикам эксплуатационной нагруженности (5) и эксплуатационной напряженности (6) устанавливаются параметры переменных максимальных и минимальных номинальных напряжений $\sigma_{n\max}^3(\tau)$, $\sigma_{n\min}^3(\tau)$

$$\{\sigma_{n\max}^3(\tau), \sigma_{n\min}^3(\tau)\} = F_{\sigma}\{[V_{\max}^3(\tau), V_{\min}^3(\tau)], [Q_{\max}^3(\tau), Q_{\min}^3(\tau)], F, W_{oc}, W_p\}. \quad (7)$$

Установление переходного функционала F_{σ} в выражении (7) в общем случае является сложной задачей, не имеющей четкой постановки граничных условий и методов аналитического решения. Определенные возможности для этого открываются при переходе к численным решениям многосвязных задач аэрогидроупругости и механики твердого деформируемого тела. В связи с этим для уточненного определения ресурса важное значение имеет прямое экспериментальное исследование временных процессов эксплуатационной нагруженности и напряженности по характеристикам режимов $R_{\max}(\tau)$, $R_{\min}(\tau)$ эксплуатации

$$\{\sigma_{n\max}^3(\tau), \sigma_{n\min}^3(\tau)\} = F_{\sigma}\{R_{\max}(\tau), R_{\min}(\tau)\}. \quad (8)$$

Выражение (8) определяет “портрет” эксплуатационной напряженности по режимам эксплуатации. По циклическим процессам эксплуатационного нагружения для всей его истории устанавливаются две определяющие величины: 1) амплитуда номинальных напряжений $\sigma_a^3(\tau)$

$$\sigma_a^3(\tau) = \frac{\sigma_{n\max}^3(\tau) - \sigma_{n\min}^3(\tau)}{2}; \quad (9)$$

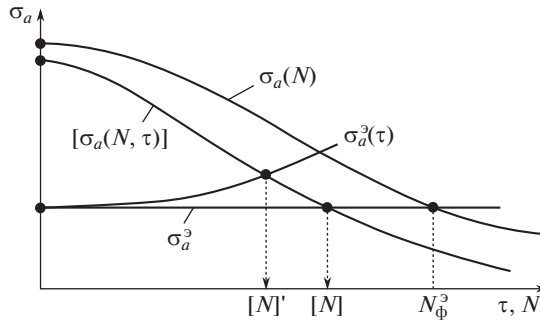


Рис. 4. Схема построения расчетных кривых циклической прочности.

2) коэффициент асимметрии напряжений

$$r(\tau) = \sigma_{n\min}^3(\tau) / \sigma_{n\max}^3(\tau). \quad (10)$$

При этом для условий циклического нагружения наряду с временным ресурсом $[\tau]$ и τ_{Φ}^3 (рис. 3) вводится поцикловый ресурс $[N]$ и N_{Φ}^3

$$\{[N], N_{\Phi}^3\} = F_N\{[\tau], \tau_{\Phi}^3, f\}, \quad (11)$$

где f – частота циклов нагружения. На этой основе по аналогии с выражениями (3), (4) и рис. 2 строятся кривые циклической прочности $\sigma_a^3(\tau)$ или $\sigma_a^3(N^3)$ и долговечности N^3

$$\{\sigma_a^3(N^3)\} = F_N\{\sigma_T(\tau), \sigma_B(\tau), N^3, r, \psi_K(\tau)\}, \quad (12)$$

где $\psi_K(\tau)$ – пластичность (относительное сужение поперечного сечения).

На рис. 4 приведены базовые кривые циклической прочности σ_a и долговечности N (или τ), для построения которых принято: σ_a^3 – амплитуда постоянных эксплуатационных напряжений (без учета уменьшения сечения); $\sigma_a^3(\tau)$ – амплитуда переменных напряжений с учетом изменения сечения в процессе нагружения; $\sigma_a(N)$ – амплитуда разрушающих напряжений без учета изменения механических свойств во времени; $\sigma_a(N, \tau)$ – амплитуда разрушающих напряжений с учетом изменения во времени характеристик механических свойств материала $\sigma_T(\tau)$, $\sigma_B(\tau)$ и $\psi_K(\tau)$.

По выражению (12) и рис. 4 оцениваются следующие характеристики ресурса: N_{Φ}^3 – расчетный ресурс по разрушению; $[N]$ – допускаемый ресурс; $[N]'$ – уточненный ресурс с учетом изменения размеров сечения и кинетики механических свойств; $[\sigma_a(N, \tau)]$ – допускаемые амплитуды переменных напряжений.

В инженерные расчеты прочности и ресурса вводятся условные упругие напряжения $\sigma_a^* = e_a E$. При числе циклов нагружения $N \geq 10^4$ условные и фактические напряжения практически совпадают $\sigma_a^* \approx \sigma_a$ (в силу малости пластических деформаций $\Delta e_p \ll \Delta e_e$). В области малого числа циклов ($10^1 \leq N \leq 10^3$) значения $\sigma_a \ll \sigma_a^*$. Повышение коэффициента асимметрии цикла напряжений r_{σ} (от -1 до 0 и более) вызывает понижение расчетной кривой усталости [2, 11].

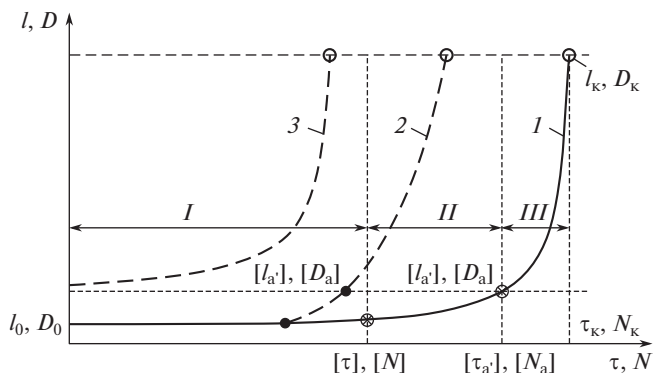


Рис. 5. Схема оценки ресурса и поврежденности на различных стадиях эксплуатации.

Под живучестью несущих элементов конструкций понимается их способность не переходить из штатного и аварийного состояний в катастрофическое состояние с полной невозвратной потерей эксплуатационной работоспособности. При этом живучесть конструкции в целом определяется живучестью ее критических несущих элементов, получивших технологические и эксплуатационные дефекты l и повреждения D , выходящие за пределы действующих норм и правил. Полное устранение этих дефектов и повреждений в ряде случаев является или технически и технологически невозможным, или экономически неоправданным.

Схема анализа ресурса и поврежденности конструкций на различных стадиях эксплуатации приведена на рис. 5.

При рассмотрении этой схемы приняты следующие обозначения: τ – временной ресурс (в годах); N – поцикловый ресурс (в числах циклов нагружения); l – размер дефектов в несущем критическом элементе; D – повреждение несущего критического элемента; l_0, D_0 – размер дефектов и повреждение в исходном состоянии ($\tau = 0, N = 0$) до начала эксплуатации; $[l], [D]$ – допускаемые по нормам размеры дефектов и повреждений ($l_0 \leq l \leq [l], D_0 \leq D \leq [D]$) при нормативно допускаемом сроке эксплуатации (штатные ситуации) $\tau \leq [\tau], N \leq [N]$; $[l_a], [D_a]$ – допускаемые размеры дефектов и повреждений в аварийной ситуации; l_k, D_k – критические величины дефектов и повреждений при возникновении аварийной ситуации; I – стадия нормальной эксплуатации (штатные ситуации); II – стадия допускаемой поврежденности – стадия перехода от штатной допускаемой эксплуатации к разрешенной по нормам эксплуатации с возникновением специально обоснованных параметров ($[\tau] \leq \tau \leq [\tau_a]$) (продленной за пределами $[N] \leq N \leq [N_a]$ по нормам ресурса ($\tau > [\tau], N > [N]$)); III – стадия живучести – стадия перехода от допускаемых нештатных ситуаций к аварийным и катастрофическим ($[\tau_a] \leq \tau \leq \tau_k, [N_a] \leq N \leq N_k$); 1 – кривая расчета роста дефектов и накопления повреждений ($0 \leq \tau \leq \tau_k, 0 \leq N \leq N_k$) с достижением предельного состояния при сохранении проектных режимов эксплуатации и без проведения ремонтно-восстановительных работ ($\tau_k \gg [\tau], N_k \gg [N]$); 2 – кривая ускоренного роста дефектов и накопления повреждений при эксплуатации за счет неучтенных факторов эксплуатационного нагружения, воздействий сред, деградации материала ($\tau_k \geq [\tau_a], N_k \geq [N_a]$); 3 – кривая роста дефектов и накопления повреждений при эксплуатации за счет ошибок при проектировании, испытаниях или эксплуатации, пропуска опасных дефектов при дефектоскопическом контроле, нарушений правил эксплуатации и контроля ($\tau_k < [\tau], N_k < [N]$).

Основная задача обеспечения живучести и защищенности несущих элементов заключается в выполнении условий неравенств

$$(\tau_k - [\tau_a])/[\tau] \geq n_\tau, \quad (N_k - [N_a])/[N] \geq n_N, \quad (13)$$

где n_τ, n_N – запасы по временному ресурсу и долговечности на стадии проектирования.

Большинство элементов машин и конструкций эксплуатируются в соответствии с кривой 1 (рис. 5). При эксплуатации ряда машин и конструкций в соответствии с кривой 2 осуществляются диагностические и ремонтно-восстановительные работы по продлению срока их эксплуатации. Наиболее опасным состоянием является случай анализа живучести по кривой 3, когда имеют место предкритические или критические повреждения в пределах ресурса $\tau \ll [\tau]$ и $N \ll [N]$. Крупнейшие в мире катастрофы произошли при реализации процессов перехода от штатных к катастрофическим ситуациям по сценарию кривой 3 на рис. 5 [1, 6, 7].

Таким образом, знание напряженно-деформированного состояния, основных повреждающих факторов, кинетики повреждений и формирование соответствующих определяющих уравнений состояния позволяет осуществить анализ структуры и условий достижения тех или иных предельных состояний в элементах высоконагруженных машин и конструкций в процессе их эксплуатации. При этом предельные состояния характеризуются определяющими несущую способность критериями прочности, деформативности, ресурса и живучести, основанными на базовых положениях механики деформируемого твердого тела, линейной и нелинейной механики разрушения с применением критериальной базы конструкционного материаловедения, а также критериями риска возникновения нештатных ситуаций.

Стратегия решения поставленных задач комплексной оценки прочности, ресурса, живучести и безопасности объектов техносферы согласно изложенной выше методологии определяет и закрепляет переход на анализ и управление рисками, как на основополагающую систему регулирования и обеспечения безопасности эксплуатации машин и конструкций в дополнение и взамен существовавших ранее подходов к обеспечению, в основном, прочности и ресурса. Такой переход основывается на решении двух основных фундаментальных задач: 1) определения предельных состояний с учетом риска возникновения катастрофических ситуаций; 2) определения и закрепления на концептуальном, правовом и нормативном уровне приемлемых (допустимых) состояний объектов техносферы с обеспечением уровня допустимого риска и безопасных отклонений от этого уровня с возможным последующим регулируемым возвращением таких объектов в штатные состояния.

Основополагающими элементами решения проблем безопасности эксплуатации объектов техносферы при сложных режимах их нагруженности являются уравнения состояния, критерии разрушения и риска возникновения чрезвычайных ситуаций, образующие в комплексе многопараметрическую систему оценки прочности, ресурса, живучести и безопасности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Махутов Н.А.* Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука, 2017. 724 с.

2. *Когаев В.П.* Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.
3. *Степнов М.Н.* Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций. Новосибирск: Наука, 2005. 342 с.
4. *Морозов Е.М., Солдатенков А.П.* Контактные задачи механики разрушения. М.: "ЛИБРОКОМ". 2017. 544 с.
5. *Ботвина Л.Р., Демина Ю.А., Петрова И.М., Гадolina И.В., Арсенкин А.М.* Влияние эксплуатации на механические характеристики рельсовой стали // Машиностроение и инженерное образование. 2015. № 4 (45). С. 27.
6. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность. М.: МГОФ "Знание, 2018. 1016 с.
7. *Махутов Н.А., Гаденин М.М., Лепихин А.М., Шокин Ю.И.* Расчетное обоснование защищенности перспективных машин и человеко-машинных систем по критериям риска аварий и катастроф // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 5. С. 66.
8. *Троценко В.Т., Лебедев А.А., Стрижало В.А. и др.* Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. Киев: Логос, 2000. 571 с.
9. *Романов А.Н.* Сопrotивление деформированию конструкционных металлических материалов при циклическом нагружении // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 4. С. 41.
10. *Гаденин М.М.* Оценка влияния режимов нагружения на условия достижения предельных состояний и назначение запасов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 10. С. 65.
11. *Махутов Н.А.* Критериальная база прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности машин и человеко-машинных комплексов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 25.
12. *Матвиенко Ю.Г.* Тенденции нелинейной механики разрушения в проблемах машиностроения. М.-Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований. 2015. 56 с.
13. *Романов А.Н.* Роль структурного состояния в формировании деформационных, прочностных, трибологических и технологических свойств конструкционных материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 3. С. 69.
14. *Ботвина Л.Р., Тютин М.Р., Петерсон Т.Б., Левин В.П., Солдатенков А.П., Просвирнин Д.В.* Остаточная прочность, микротвердость и акустические свойства циклически деформируемой малоуглеродистой стали // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 6. С. 44.
15. *Махутов Н.А., Гаденин М.М., Одинцев И.Н., Разумовский И.А.* Развитие методов расчетного и экспериментального определения локальных остаточных напряжений при сложных спектрах нагружения. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 6. С. 53.
16. *Матвиенко Ю.Г., Большаков А.М., Бурнашев А.В.* Натурные испытания сосудов давления при низких температурах и действии внешнего электрического потенциала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 1. С. 78.
17. *Разумовский И.А., Чернятин А.С.* Расчетно-экспериментальный метод исследования остаточных напряжений в двухслойных элементах конструкций способом сверления отверстий // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 4. С. 101.