

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.169:621.4:539.4

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ И ПАРАМЕТРОВ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

© Н. А. Махутов¹

Статья поступила 19 октября 2016 г.

Показана роль характеристик прочности и ресурса в обеспечении эксплуатационной безопасности и защищенности объектов. Отмечено, что силовые и деформационные критерии и основанные на них уравнения состояния, включающие в себя характеристики механических свойств материалов, в полной мере описывают условия достижения предельных состояний с образованием и развитием разрушения. Включение в такую систему уравнений и критериев риска, в состав ключевых параметров которых входят также характеристики прочности и ресурса, позволяет использовать их в качестве универсального подхода к определению уровня опасности эксплуатации объекта и управлять рисками возникновения аварий и катастроф на рассматриваемых объектах.

Ключевые слова: прочность; ресурс; разрушение; уравнения состояния; критерии; механические свойства; предельные состояния; риск; безопасность; аварии; катастрофы.

На протяжении многих десятилетий наша секция уделяет большое внимание научно-методическому обоснованию прочности, ресурса, живучести, безопасности материалов, машин и конструкций [1]. Это требует детального анализа результатов комплексных фундаментальных и прикладных исследований в междисциплинарной постановке с формированием соответствующих определяющих уравнений и их базовых параметров. Если первые из таких уравнений — по запасам статической прочности, деформативности, жесткости и устойчивости — до середины прошлого столетия были простейшими, то в дальнейшем появились новые представления, учитывающие условия деформирования в областях кратковременного, длительного, циклического, высокоскоростного, высокотемпературного и низкотемпературного нагружений. В связи с анализом условий деформирования и разрушения в упругопластической области во второй половине XX века был осуществлен переход от расчета в напряжениях σ , принятого в обычной инженерной практике (что было справедливо для линейной механики деформирования и разрушения), к расчету в упругопластических деформациях e [2 – 9]. Сейчас такая постановка задачи введена в целый ряд норм, в том числе атомной энергетике, и она, безусловно, будет развиваться и использоваться в дальнейшем. Это касается случаев, когда в связи с обеспечением безопасных условий эксплуатации инженерных объектов детальному анализу подлежат экстремальные ситуации по параметрам на-

пряжений σ , деформаций e , долговечности по числу циклов N и времени τ , а также воздействиям окружающей среды Φ , способным привести к тяжелым авариям и катастрофам [2 – 4].

При рассмотрении предельных состояний на всех стадиях жизненного цикла (проектирование, изготовление, эксплуатация, вывод из эксплуатации), которые имеют место при обосновании прочности, ресурса, надежности, живучести, безопасности, рисков и защищенности объектов, критериальная база и система расчетных уравнений, включающие в себя названные выше параметры, становятся более сложными и насыщенными учитываемыми в них факторами [10]. Решение сложных линейных, нелинейных и связанных задач, задач математического и физического моделирования становится новой специальной сферой фундаментальных знаний, которые все шире используются в практике создания уникальных объектов техносферы жизнеобеспечения.

Эффекты концентрации напряжений, краевые задачи теории упругости и пластичности в настоящее время трансформировались в очень сложные научные, конструкторские, технологические, социально-экономические проблемы с применением аналитических, численных и экспериментальных методов для стадий нелинейного поведения материалов и конструкций, когда их механические свойства начинают сильно меняться в процессе изготовления и эксплуатации с учетом сочетаний всех типов предельных состояний [1 – 10].

В качестве примера решения подобной задачи можно рассмотреть современный подход к анализу

¹ Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия; НИИ Транснефть, Москва, Россия; e-mail: kei51@mail.ru

прочности и ресурса сосудов давления в таких ответственных отраслях, как атомная энергетика, ракетно-космическая техника, нефтегазохимия, когда имеет место широкое изменение эксплуатационных давлений p^3 , обуславливающее соответствующую кинетику номинальных и местных деформаций e^3 и напряжений σ^3 . При этом в случае появления в рассматриваемых конструктивных элементах локальных зон упруго-пластического деформирования деформации e^3 возрастают более интенсивно, чем напряжения σ^3 , а коэффициенты концентрации деформаций K_e могут существенно превышать теоретические коэффициенты концентрации напряжений α_σ в упругой области, в то время как коэффициенты концентрации напряжений в упругопластической области K_σ — снижаться ($K_\sigma \leq \alpha_\sigma \leq K_e$).

При рассмотрении перехода от статического к циклическому режиму нагружения с увеличением времени эксплуатации t необходимо проведение анализа указанных выше локальных зон и условий достижения в них предельных состояний с учетом возможного, а часто и имеющего место изменения во времени характеристик всех основных механических свойств конструкционных материалов.

Для случаев эксплуатации в области низких температур в расчетный анализ вводятся первая t_{k1} и вторая t_{k2} критические температуры, характеризующие переход материала конструкции в опасные квази-хрупкие и хрупкие состояния.

Живучесть конструкции анализируют в том случае, если при эксплуатации не удается удержать высоконагруженные объекты, имеющие начальные технологические, а затем и эксплуатационные повреждения и дефекты l , на их допускаемых уровнях. В экстремальных ситуациях они могут оказаться выше приемлемых значений, тогда необходимо индивидуально рассчитать, оценить, исследовать и обосновать живучесть таких объектов на базе линейной и нелинейной механики разрушения, в том числе с применением новейших систем дефектоскопии, дефектометрии, фрактодиагностики для определения реальных параметров и характера поврежденностей.

Реализация названных выше расчетных принципов, схем, случаев и критериев для анализа условий достижения предельных состояний требует постановки и проведения большого комплекса фундаментальных исследований и постепенного совершенствования методов расчетного обоснования прочности, ресурса, рисков и безопасности для всех стадий жизненного цикла [2 – 4, 9 – 12].

Простейшие расчеты несущей способности с введением запасов прочности n по напряжениям σ (по пределам текучести σ_T и прочности σ_B) были и остаются основой для выбора основных размеров всех несущих элементов объектов техносферы.

Для случаев циклического нагружения используют соответствующие степенные выражения с вве-

дением в них (наряду с уже названными выше характеристиками материала) предела выносливости σ_{-1} и сопротивления отрыву S_K . При этом расчеты (и соответственно расчетные параметры) в терминах напряжений σ переводят в расчеты по деформациям e или условным упругим напряжениям σ^* как для упругой, так и для упругопластической областей деформирования.

Переход к анализу прочности и ресурса при высоких температурах в таких отраслях техники, как авиация, ракетно-космическая техника, атомная энергетика, связан с использованием уравнений длительной прочности σ_{dl} для времени эксплуатации τ^3 от 10^{-3} до $3 \cdot 10^5$ ч.

В рамках линейной и нелинейной механики разрушения возможность оценки живучести по критериям трещиностойкости с учетом упругих и упругопластических деформаций e в анализируемой зоне деформирования связывается с одновременным использованием коэффициентов интенсивности напряжений K_I и деформаций K_{Ie} , а также базовых подходов линейной и нелинейной механики разрушения, описывающих скорости роста трещин по числу циклов (dl/dN) и времени (dl/dt).

Обобщенные расчетные зависимости для оценки циклической прочности и ресурса по критериям локальной прочности $[\sigma^*]$ и долговечности $[N]$ с переменными для рассматриваемых локальных зон коэффициентами концентрации напряжений K_σ и деформаций K_e сформированы на базе названных выше фундаментальных критериальных зависимостей с введением в них соответствующих запасов по напряжениям n_σ и долговечности n_N как для упругих, так и для пластических состояний [2, 4].

Расчетные зависимости для количественного определения живучести несущих элементов с растущими дефектами l включают в себя запасы по критическим температурам $[\Delta t]$ и коэффициентам интенсивности напряжений n_{K_σ} и деформаций n_{K_e} в системе уравнений, описывающих рост трещин по числу циклов dl/dN и времени dl/dt .

Одной из конечных стадий рассматриваемого построения комплексной системы уравнений для определения условий достижения предельных состояний является построение трехмерных пространственных поверхностей предельных и допустимых состояний (рис. 1) [2 – 4]. Вектор \mathbf{P} воздействий, допускаемых на анализируемый объект, должен оставаться в допускаемой зоне. Для таких поверхностей координатными являются оси:

показателей эксплуатационной нагруженности (усилий P , номинальных напряжений σ_n , коэффициентов интенсивности напряжений K_I , приведенных локальных максимальных напряжений $(\sigma_{пр})_{\max k}$ в зонах концентрации);

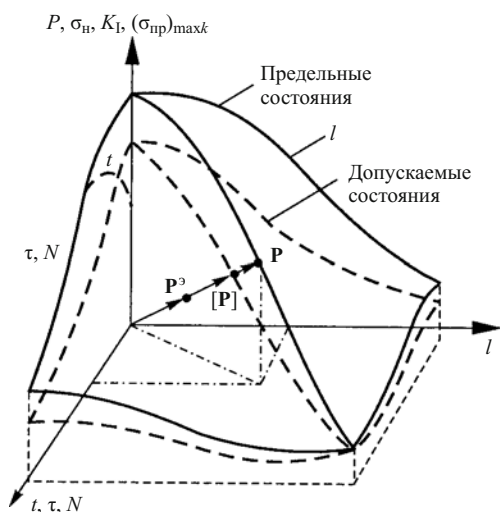


Рис. 1. Поверхности предельных и допускаемых состояний

температурно-временных и циклических параметров эксплуатации (температуры t , времени τ , числа циклов нагружения N);

состояния дефектности (размеров l дефектов с учетом их формы и пространственного расположения).

Как отмечено выше, образование разрушений, недопустимых пластических деформаций или трещин в анализируемых зонах объектов соответствует достижению предельного состояния (поверхности предельных состояний). Предельная нагрузка \mathbf{P} в этом случае является вектором, проходящим через начало координат, с углами, соответствующими данному состоянию конструкции [по параметрам $l, t, \tau, N, \sigma_n, K_1, (\sigma_{пр})_{max} k$]. Если при этом ввести необходимые запасы n по указанным параметрам, то от поверхности предельных состояний можно перейти (через область между штриховой и сплошной кривыми на рис. 1) к поверхности допускаемых состояний и допускаемой нагрузке $[\mathbf{P}]$. На этой основе прочность, ресурс и живучесть можно считать обеспеченными, если вектор эксплуатационной нагрузки для тех или иных конкретных условий \mathbf{P}^0 будет меньше или равен вектору допускаемой для этих условий нагрузки $[\mathbf{P}]$, т.е. $\mathbf{P}^0 \leq [\mathbf{P}]$.

Классические (традиционные) методы расчета прочности и ресурса изначально развивались в предположении бездефектного конструкционного материала ($l = 0$). В этом случае от предельных и допускаемых поверхностей можно перейти к предельным и допускаемым кривым (в плоскости $P, \sigma_n, K_1, (\sigma_{пр})_{max} k - t, \tau, N$) статической (при заданной температуре t), длительной статической (по заданному времени τ) и циклической (по заданному числу циклов N) прочности.

Прочность и живучесть на первых этапах определяли по критериям линейной механики разрушения (статическая трещиностойкость) для плоскости $P, \sigma_n, K_1, (\sigma_{пр})_{max} k - l$. Для современных расчетов прочности, ресурса и живучести с использованием предельных и допускаемых состояний (см. рис. 1) важным является принятие единых уравнений состояния, единых кри-

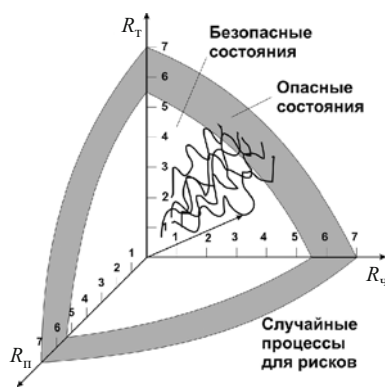


Рис. 2. Трехмерное пространство поверхностей опасных и безопасных состояний для рисков

териев разрушения и единых комплексов расчетных характеристик независимо от типа конструкции, свойств конструкционных материалов и условий эксплуатационного нагружения.

Рассмотренные закономерности деформирования и разрушения конструкционных материалов составляют вместе с результатами диагностики и мониторинга состояния анализируемых объектов основу баз данных и баз знаний для оценки прочности, ресурса и живучести этих объектов. Входящие в них характеристики механических свойств материалов являются исходными для проведения комплексных оценок техногенной безопасности и защищенности рассматриваемого оборудования в условиях сложных эксплуатационных воздействий.

В общем случае комплексный подход к построению обобщающей системы уравнений для определения в рассматриваемом направлении условий достижения предельных состояний состоит в удовлетворении комплекса требований по названным выше параметрам в последовательности «прочность → ресурс → живучесть → безопасность → риск → защищенность». Отсюда, в дополнение к рассмотренному выше построению поверхностей предельных состояний по параметрам прочности, ресурса и живучести, вводят понятия обеспечения условий безопасной эксплуатации объектов и их защищенности по параметрам рисков $R^0(\tau)$ для уровней (классов) опасностей от 1 до 7 на заданном этапе τ^0 их функционирования, количественные значения которых могут быть получены через вероятности $P_i^0(\tau)$ возникновения аварийных или катастрофических ситуаций и величины возможных экономических ущербов $U_i^0(\tau)$ при их реализации. При этом учитывается взаимодействие трех основных факторов — человеческого $R_c(\tau)$, техногенного $R_t(\tau)$ и природного $R_n(\tau)$, что позволяет построить (по аналогии с рис. 1) трехмерное пространство рисков и их предельных поверхностей (рис. 2).

Параметр обеспечения безопасности в этом случае может быть определен в виде соответствующего запаса по риску n_R , представляющему собой отношение критического (недопустимого, неприемлемого)

риска $R^3(\tau)$ к его текущему значению $R^3(\tau)$ для рассматриваемого объекта. На всех стадиях жизненного цикла вектор состояний безопасности по рискам $R_N(\tau)$ должен находиться в приемлемой (светлой на рис. 2) области.

Фаза инициирования повреждений, отказов, разрушений, аварий, катастроф и соответствующих им рисков $R(\tau)$ может представлять собой как краткосрочный, так и длительный процесс, включающий в себя различные этапы отклонений от заданных режимов эксплуатации, накопления механических повреждений в оборудовании, отказов, а также нарушения контроля за качеством и состоянием объекта и обслуживающим его персоналом. Начальная фаза накопления повреждений d , отказов и частичных разрушений с развитием трещин l заканчивается возникновением на объекте аварийной ситуации, которая может быть связана с начавшимися каскадными разрушениями и необратимыми отклонениями от условий нормальной эксплуатации. Наступление катастрофы с образованием критических дефектов l_k является заключительной стадией развития неблагоприятных ситуаций и характеризуется самыми высокими, неприемлемыми (критическими) рисками $R(\tau) = R_k(\tau)$ (за пределами затемненной области на рис. 2).

Из изложенного следует постановка новой задачи об определении и обеспечении комплексной безопасности и защищенности рассматриваемого объекта по критериям приемлемых и управляемых рисков. При такой постановке задачи только безопасность и защищенность с заданными уровнями рисков дают основание для принятия решений о допустимости реализации новых проектов или допустимости эксплуатации действующих объектов.

Таким образом, характеристики прочности и ресурса для обеспечения безопасности и защищенности в эксплуатации рассматриваемых объектов следует определять из анализа силовых и деформационных критериев и основанных на них уравнений состояния, описывающих условия образования и развития разрушения. Параметрами таких критериев и уравнений являются данные о типах конструкционных материалов, о стандартных и специальных характеристиках их механических свойств, о конструктивных формах рассматриваемых элементов и об их эксплуатационной нагруженности. При этом систему уравнений состояния для описания взаимосвязи текущих повреждений, внешних воздействий и реакций на них выстраивают с учетом изменения свойств конструкционных материалов на всех стадиях жизненного цикла (см. рис. 1). Включение в комплексную систему уравнений для определения условий достижения предельных состояний критериев риска (см. рис. 2), в состав ключевых параметров которых входят также характеристики прочности и ресурса, позволяет использовать их в качестве универсального подхода к определению уровня опасности эксплуатации объекта и управлять процес-

сами проектирования и эксплуатации этого объекта для снижения уровней опасности.

Вопросы развития комплексных расчетно-экспериментальных методов исследований будут освещены и в последующих статьях раздела данного номера, а также в дальнейших публикациях 2017 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н. А. Базовые характеристики конструкционных материалов при комплексной оценке прочности, ресурса и живучести опасных объектов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. С. 62 – 70.
2. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов / Под общ. ред. Н. А. Махутова. — М.: МГОФ «Знание», 2015. — 600 с.
3. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Фундаментальные исследования проблем техногенной безопасности / Под общ. ред. Н. А. Махутова. — М.: МГОФ «Знание», 2013. — 576 с.
4. Махутов Н. А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 523 с.
5. Морозов Е. М. Вязкость разрушения при некорневой особенности напряженного состояния у вершины трещины / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 12. С. 65 – 66.
6. Матвиенко Ю. Г. Имитационное моделирование для анализа параметров механики разрушения нестандартных образцов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 10. С. 50 – 56.
7. Матюнин В. М. Размерный эффект и его влияние на механические свойства материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 2. С. 64 – 68.
8. Ботвина Л. Р. и др. Развитие пластических зон и поврежденности при различных видах нагружения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 5. С. 46 – 55.
9. Гаденин М. М. Характеристики механических свойств материалов при анализе условий достижения предельных состояний / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 2. С. 58 – 63.
10. Махутов Н. А. Обобщенные закономерности процессов деформирования и разрушения. Роль обоснования ресурса, живучести и безопасности уникальных объектов / Материалы заседания Президиума РАН. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Информационный бюллетень. Вып. 4. — М.: МГОФ «Знание», 2016. — 76 с.
11. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности: Учебное пособие / Под общ. ред. В. В. Клюева. — М.: Издательский дом «Спектр», 2011. — 187 с.
12. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Комплексные расчетно-экспериментальные методы оценки штатных и предельных состояний высокорисковых объектов / Доклады Сессии Научного совета РАН по автоматизированным системам диагностики и испытаний. Москва. 26 ноября 2014 г. — М.: Издательский дом «Спектр», 2014. С. 34 – 57.

REFERENCES

1. Makhutov N. A. Bazovye kharakteristiki konstruktсионnykh materialov pri kompleksnoi otsenke prochnosti, resursa i zhivuchesti opasnykh ob"ektov [Basic characteristics of structural materials in integrated assessment of strength, resource and survivability of structural materials] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. P. 62 – 70 [in Russian].
2. Makhutov N. A. (Ed.). Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno tekhnicheskie aspekty Upravlenie resursom ekspluatatsii vysokoriskovykh ob"ektov [Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Control of service resource of high-risk objects]. — Moscow: MGOF "Znanie," 2015. — 600 p. [in Russian].
3. Makhutov N. A. (Ed.). Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno tekhnicheskie aspekty. Fundamental'nye issledovaniya problem tekhnogennoi bezopasnosti [Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Fundamental researches of engineering safety problems]. — Moscow: MGOF "Znanie," 2013. — 576 p. [in Russian].

4. **Makhutov N. A.** Prochnost' i bezopasnost'. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya [Strength and safety. Fundamental and applied researches]. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 523 p. [in Russian].
5. **Morozov E. M.** Vyazkost' razrusheniya pri nekornevoi osobennosti napyazhennogo sostoyaniya u vershiny treshchiny [Fracture toughness in unrooted singularity of the stress state at the crack tip] / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2012. Vol. 78. N 12. P. 65 – 66 [in Russian].
6. **Matvienko Yu. G.** Imitatsionnoe modelirovanie dlya analiza parametrov mekhaniki razrusheniya nestandardnykh obraztsov [Simulation modelling for the analysis of fracture mechanics parameters of non-standard samples] / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2013. Vol. 79. N 10. P. 50 – 56 [in Russian].
7. **Matyunin V. M.** Razmernyi éffekt i ego vliyanie na mekhanicheskie svoystva materialov [The influence of scale effect on the mechanical properties materials] / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2012. Vol. 78. N 2. P. 64 – 68 [in Russian].
8. **Botvina L. R., Zharkova N. A., Tyutin M. R., Soldatenkov A. P., Demina Yu. A., and Levin V. P.** Razvitiye plasticheskikh zon i povrezhdenosti pri razlichnykh vidakh nagruzheniya [Development of the plastic strain zones and damage under different types of loading] / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2013. Vol. 79. N 5. P. 46 – 55 [in Russian].
9. **Gadenin M. M.** Kharakteristiki mekhanicheskikh svoystv materialov pri analize uslovii dostizheniya predel'nykh sostoyanii [Characteristics of the materials mechanical properties of materials in analysis of achieving limiting state conditions] / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2012. Vol. 78. N 2. P. 58 – 63 [in Russian].
10. **Makhutov N. A.** Obobshchennye zakonomernosti protsessov deformirovaniya i razrusheniya. Rol' obosnovaniya resursa, zhivuchesti i bezopasnosti unikal'nykh ob"ektov [The generalized regularities of deformation and fracture processes. A role of a justification of resource, survivability and safety for unique objects] / *Materialy zasedaniya Prezidiuma RAN. Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ékonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty. Informatsionnyi byulleten'* [Proceedings of the meeting of the Presidium of Russian Academy of Sciences. Russian Safety. legal, socio-economic, scientific and technical aspects. News bulletin]. Issue 4. — Moscow: MGOF "Znanie," 2016. — 76 p. [in Russian].
11. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Tekhnicheskaya diagnostika ostanovivshisya resursa i bezopasnosti: Uchebnoe posobie [Engineering diagnostics of the remaining resource and safety. Tutorial]. — Moscow: Izdatel'skii dom "Spektr," 2011. — 187 p. [in Russian].
12. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Kompleksnyye raschetno-éksperimental'nye metody otsenki shtatnykh i predel'nykh sostoyanii vysokoriskovykh ob"ektov [Complex computational and experimental methods for evaluating staff and limit states of high-risk facilities] / *Doklady Sessii Nauchnogo soveta RAN po avtomatizirovannym sistemam diagnostiki i ispytaniyu* [Reports of the sessions of the Scientific Council of RAS on automated systems and diagnostic testing]. Moscow. November 26, 2014. — Moscow: Izdatel'skii dom "Spektr," 2014. P. 34 – 57 [in Russian].