

УДК 531.8

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНОЙ ЖИВУЧЕСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Член-корреспондент РАН *Н.А. Махутов*, кандидат техн. наук *Д.О. Резников*
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Рассматривается прочностная живучесть как способность технических систем сопротивляться накоплению повреждений и разрушению на различных масштабно-структурных уровнях. Многоуровневое сценарное дерево используется для описания реакции системы на локальные повреждения, которые возникают на различных уровнях его масштабно-структурной иерархии. Семейство кривых живучести используется для проведения оценки живучести.

Ключевые слова: техническая система, прочностная живучесть, накопление повреждений, разрушение.

ASSESSMENT OF STRUCTURAL DAMAGE RESISTANCE OF TECHNICAL SYSTEMS

Corresponding Member of the RAS *N.A. Makhutov*, Ph.D. (Tech) *D.O. Reznikov*
The RAS Institute for Machine Sciences

The paper considers structural damage resistance as an integral property of complex technical system that characterizes its ability to sustain damage that occurs at various scale levels. A multilevel scenario tree is used to describe the system response to local damages at various scale levels of the system. A family of damage resistance curves is used in assessment

Keywords: complex technical system, structural damage resistance, damage accumulation, fracture.

1. Введение

В общем случае под живучестью технической системы (далее ТС) понимается ее свойство сохранять в течение некоторого времени работоспособность при наличии развивающихся дефектов и повреждений различного характера. В более узкой постановке, связанной с обеспечением конструкционной прочности и структурной целостности ТС, может быть введено понятие прочностной (конструкционной) живучести, под которым понимается способность системы продолжать воспринимать нагрузки и сопротивляться деформированию и разрушению после возникновения повреждений на различных масштабных уровнях. Источниками прочностной живучести являются:

- физико-механические свойства конструкционных материалов, позволяющие системе сопротивляться деформированию и разрушению;
- заложенные в систему запасы прочности по различным механизмам достижения предельных состояний;
- наличие в системе структурной избыточности и альтернативных путей передачи нагрузки;
- осуществление процедур мониторинга состояния компонентов системы и наличие систем защиты.

Понятие прочностной живучести технической системы является центральным при анализе ее поведения после того как в ней возникают локальные повреждения. Системы, обладающие высокой живучестью, разрушаются постепенно, сохраняя при этом ограниченную работоспособность. Это позволяет оператору системы принять защитные меры (провести ремонт, замену поврежденных элементов, перевести систему в безопасный режим эксплуатации, выполнить аварийный останов и т.д.), тем самым, сводя последствия аварии главным образом к первичным ущербам от повреждения элементов системы. Системы с малой живучестью разрушаются резко и катастрофически, что сопровождается значительными вторичными и каскадными разрушениями, которые являются несоизмерными (непропорциональными) иницилирующим воздействиям, и вызванными ими первичными повреждениями [1-6].

2. Иерархические процессы накопления повреждения и разрушения

Накопление повреждений и разрушение ТС представляет собой иерархически организованный процесс, который развивается по всей иерархии масштабов, начиная от наномасштабов, соизмеримых с межатомными расстояниями, и заканчивая макроскопическим масштабом, определяемым структурой системы в целом. На основании моделей и методов, разработанных в рамках таких дисциплин как физика прочности, физическая мезомеханика, механика накопления повреждений, механика разрушения, теория надежности, теория систем, механика катастроф было показано, что для описания процессов накопления повреждений и разрушения вполне достаточно трех масштабных уровней [8, 9]:

- мезоуровня, который интегрально учитывает более мелкие масштабы, и характеризует физико-механические свойства конструкционного материала;
- макроуровня, описывающего процессы накопления повреждений и разрушение отдельных конструктивных элементов с учетом макродефектов (элементный уровень);
- макроуровня, характеризующего последовательность разрушения в сопряженных элементах и системе в целом (системный уровень).

Таким образом, в простейшей постановке при современных методах технической диагностики (металлография, дефектоскопия, дефектометрия) можно ограничиться рассмотрением процессов разрушения на трех масштабных уровнях: (1) мезоуровне - накопление рассеянных повреждений в материале и разрушение мезообъемов, (2) элементном/локальном уровне – развитие макродефектов и разрушение на уровне конструктивных элементов (3) системном (глобальном) уровне – последовательность разрушений конструктивных элементов, приводящая к разрушению системы в целом. При этом процессы, протекающие на нано-, микро- и мезоуровне, учитываются через механические характеристики конструкционных материалов. В соответствии с выделенными масштабными уровнями могут быть сформированы и три уровня оценки прочностной живучести: (1) живучесть (стойкость) конструкционного материала, (2) живучесть конструктивных элементов системы и (3) структурная живучесть системы в целом.

В соответствии с представленной иерархией процессов разрушения, прочностная живучесть технической системы, может рассматриваться как интегральная характеристика системы, которая сочетает в себе следующую совокупность дифференцированных показателей, описывающих способность системы сопротивляться разрушению на трех масштабных уровнях:

- Живучесть конструкционного материала, определяющая его способность сохранять остаточную прочность в процессе деградации и накопления рассеянных повреждений.
- Живучесть конструктивного элемента, характеризующая его способность сопротивляться разрушению при наличии локальных повреждений и макродефектов.

- Структурная живучесть системы в целом, определяющая способность системы продолжать воспринимать нагрузку и сопротивляться разрушению после частичного или полного разрушения отдельных элементов.

Вследствие высокого уровня неопределенности, связанного с естественной вариативностью параметров системы (механических характеристик конструкционных материалов и геометрических параметров) и режимов нагружения (штатных, проектных и запроектных), оценка прочностной живучести системы должна производиться в вероятностной постановке. При этом разномасштабность процессов разрушения предопределяет то, что сложное вероятностное событие «разрушение системы» может рассматриваться как последовательность связанных вероятностных событий [10-15]:

(1) $\langle L \rangle$ - система подвергнута режиму нагружения L .

(2) $\langle MD|L \rangle$ - конструкционный материал получил определенную степень повреждения в случае, если произошло событие $\langle L \rangle$.

(3) $\langle LD|L, MD \rangle$ - достижение локального предельного состояния конструктивным элементом системы в случае реализации событий $\langle L \rangle$ и $\langle MD \rangle$.

(4) $\langle F|L, MD, LD \rangle$ - разрушение системы в случае реализации событий $\langle L \rangle$, $\langle MD \rangle$ и $\langle LD \rangle$ (рис.1).

Тогда вероятность разрушения системы может быть оценена как:

$$P(F) = P(L) \cdot P(MD|L) \cdot P(LD|L, MD) \cdot P(F|L, MD, LD), \quad (1)$$

где $P(MD|L)$ - уязвимость конструкционного материала; тогда живучесть материала может оцениваться как дополнение до 1 величины его уязвимости:

$P(\overline{MD}|L) = 1 - P(MD|L)$; $P(LD|L, MD)$ – уязвимость конструктивного элемента системы, тогда живучесть конструктивного элемента будет определяться как

$$P(\overline{LD}|L, MD) = 1 - P(LD|L, MD);$$

$P(F|L, MD, LD)$ – структурная уязвимость системы, а структурная живучесть может быть определена как: $P(\overline{F}|L, MD, LD) = 1 - P(F|L, MD, LD)$.

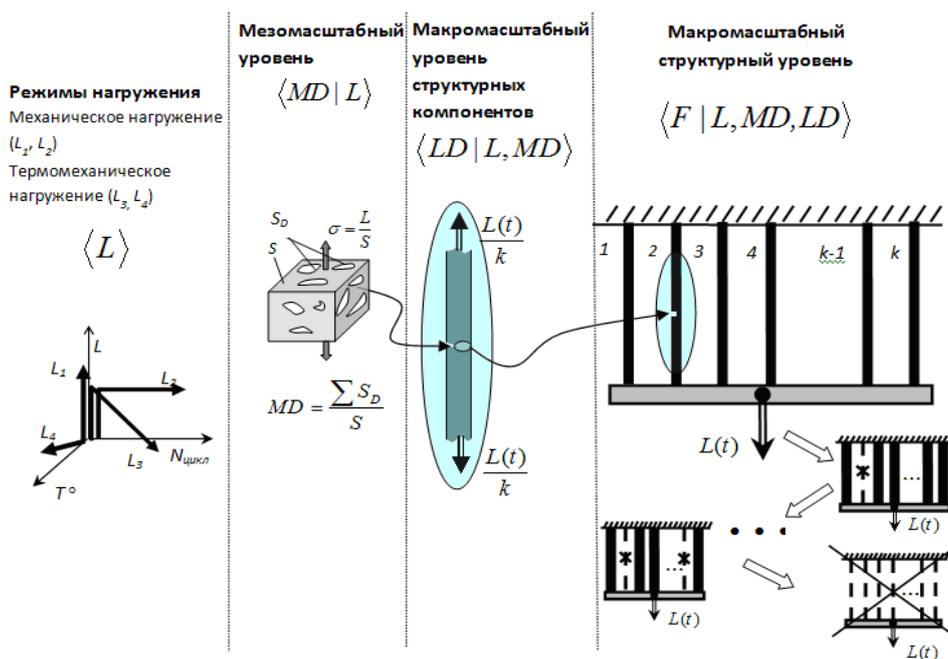


Рис. 1. Иерархическая модель накопления повреждений и разрушения

3. Многоуровневый сценарный анализ разрушения технической системы

В связи с тем, что для сложных технических систем, которые могут подвергаться различным режимам нагружения, характерна многовариантность сценариев разрушения, оценка прочностной живучести предполагает проведение анализа многоуровневого сценарного дерева, осуществляемого с привлечением графологических моделей (деревьев событий, деревьев отказа, баесовых сетей) (рис. 2). Вследствие реализации определенного режима термомеханического нагружения некоторый мезообъем конструкционного материала, расположенный в зоне концентрации напряжений может получить определенную степень повреждения по сценарию $s_i^{(m)}$ (рис. 2а). Вследствие того, что материал обладает определённой пластичностью и способностью перераспределять нагрузку между мезообъемами, разрушение одного мезообъема не означает немедленного разрушения всего элемента, но может рассматриваться как инициирующее событие сценария ($s_j^{(e)}$, рис. 2б), которое может привести к локальному повреждению элемента и его разрушению.

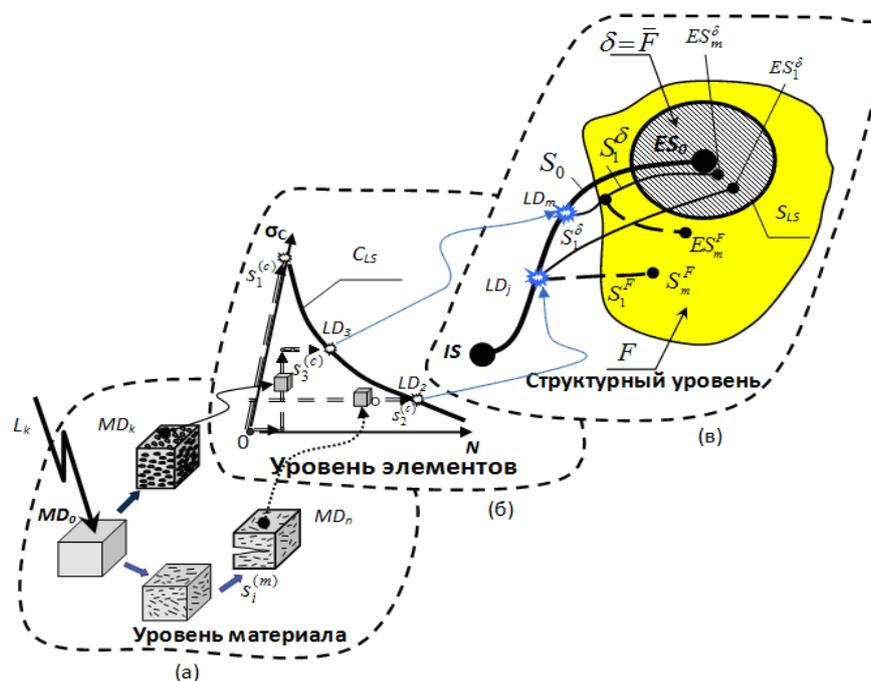


Рис. 2. Многоуровневое сценарное дерево

L_k – режим нагружения, MD_i - i -ое поврежденное состояние мезообъема конструкционного материала, $s_i^{(m)}$ - сценарий накопления повреждений конструкционного материала, $s_i^{(e)}$ сценарий разрушения конструктивного элемента, C_{LS} – функция предельных состояний конструктивного элемента, LD_j - локальное предельное состояние, F - область поврежденных состояний системы, $\delta = \bar{F}$ - область неповрежденных состояний, S_{LS} функция предельных состояний системы в целом, IS – исходное неповрежденное состояние системы, ES_0 - предписанное конечное состояние системы, $ES_1^{(F)}$ конечное состояние разрушения, $ES_1^{(\delta)}$ - конечное состояние неразрушения, находящееся в области δ , $S_1^{(\delta)}$ - макросценарий неразрушения, $S_1^{(F)}$ - макросценарий разрушения

На макромасштабном структурном уровне успешное функционирование системы описывается сценарием успеха S_0 , который задает ее переход из начального состояния (после ее изготовления/монтажа) в заданное конечное состояния ES_0 (при плановом выводе системы из эксплуатации). Сценарий разрушения $S_*^{(F)}$ должен иметь инициирующее событие – локальное разрушение отдельного элемента системы. В случае, если отдельный

элемент системы достигает предельного состояния, это не означает мгновенное разрушение системы в целом. Вследствие наличия избыточных связей, нагрузка, которая ранее воспринималась разрушенным элементом, может быть перераспределена на оставшиеся, что может привести к реализации последовательности дальнейших разрушений элементов, составляющих сценарий разрушения системы на структурном уровне $S^{*(F)}$ (рис. 2в).

Результат вероятностного многоуровневого анализа живучести ТС может быть представлен с помощью матричного уравнения [14,16,17]:

$$\begin{Bmatrix} P(ES_0) \\ \dots \\ P(ES_q) \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} P(ES_0 | LD_1) \dots P(ES_0 | LD_l) \\ \dots \\ P(ES_q | LD_1) \dots P(ES_q | LD_l) \end{bmatrix}}_{[V_{SD}]} \times \underbrace{\begin{bmatrix} P(LD_1 | MD_1) \dots P(LD_1 | MD_m) \\ \dots \\ P(LD_l | MD_m) \dots P(LD_l | MD_m) \end{bmatrix}}_{[V_{LD}]} \times \underbrace{\begin{bmatrix} P(MD_1 | L_1) \dots P(MD_1 | L_n) \\ \dots \\ P(MD_m | L_1) \dots P(MD_m | L_n) \end{bmatrix}}_{[V_{MD}]} \times \underbrace{\begin{Bmatrix} P(L_1) \\ \dots \\ P(L_n) \end{Bmatrix}}_{\{L\}} \quad (2)$$

или в краткой форме:

$$\{ES\} = [V_{SD}] \cdot [V_{LD}] \cdot [V_{MD}] \cdot \{L\}, \quad (3)$$

где $\{L\}$ вектор режимов нагружения, $L(k)=P(L_k)$; $[V_{MD}]$ – матрица уязвимости конструкционного материала, $V_{MD}(i,k)=P(MD_i|L_k)$, $[V_{LD}]$ – матрица локальной уязвимости конструктивных элементов, $V_{LD}(j,i)=P(LD_j|MD_i)$; $[V_{SD}]$ – матрица структурной уязвимости $V_{SD}(q,j)=P(ES_q|LD_j)$, $\{ES\}$ – вектор конечных состояний ТС, $ES_q=P(ES_q)$.

Произведение матриц $[V_{MD}]$, $[V_{LD}]$ и $[V_{SD}]$ представляет собой матрицу конструкционной уязвимости:

$$[V_C] = [V_{SD}] \cdot [V_{LD}] \cdot [V_{MD}]. \quad (4)$$

Эта матрица определяет связь между вероятностями реализации различных режимов нагружения и вероятностями достижения системой различных поврежденных конечных состояний:

$$\{ES(q)\} = [V_C(q,k)] \cdot \{L(k)\}. \quad (5)$$

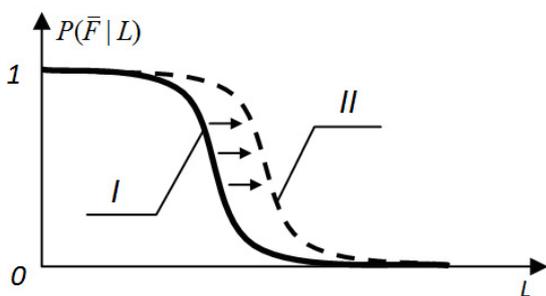


Рис. 3. Кривая живучести ТС
I и II - кривые живучести ТС соответственно до и после реализации мер, направленных на повышение ее живучести

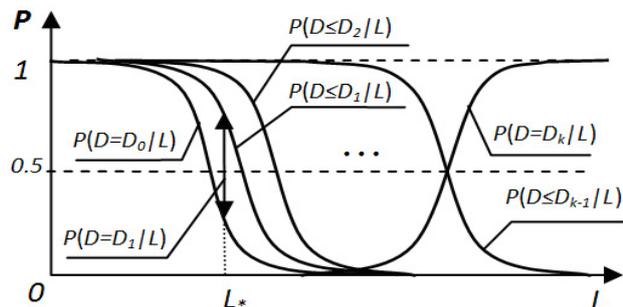


Рис. 4. Семейство кривых живучести $D_0 < D_1 < \dots < D_k$ повреждения системы, D_0 и D_k соответствуют неповрежденному состоянию системы и состоянию ее полного разрушения

Проведенный многоуровневый сценарный анализ позволяет сформировать кривую живучести системы, которая характеризует зависимость вероятности разрушения системы от интенсивности воздействия на нее (рис.3). Матричное уравнение (2) определяет три направления действий, направленных на повышение прочностной живучести: повышение живучести конструкционного материала, конструктивных элементов и системы в целом. Единственная кривая уязвимости позволяет описать свойство системы сопротивляться разрушению в случае, если рассматриваются только два конечных состояния системы: неповрежденное и разрушенное состояния. В тех случаях, когда необходимо учитывать возможность достижения системой различных поврежденных состояний и степеней повреждения, для описания прочностной живучести системы используется семейство кривых живучести (рис. 4), каждая из которых соответствует определенной степени повреждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 14 19 00776).

Литература

1. Доронин С.В., Лепихин А.М., Москвичев В.В., Шокин Ю.И. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. Новосибирск: Наука. - 2005. 250 с.
2. С.А. Тимашев, А.В. Бушинская, М.Г. Малоюкова, Л.В. Полуян. Целостность и безопасность трубопроводных систем /Екатеринбург: АМБ. - 2013. 589 с.
3. Махутов Н.А., Петров В.П., Резников Д.О. Оценка живучести сложных технических систем//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2009. № 3. С. 47-66.
4. Доронин С.В., Москвичев В.В. Моделирование прочности, надежности и живучести поврежденных элементов конструкций // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2007. № 1. С. 37-42.
5. Доронин С.В. Расчеты живучести при проектировании машиностроительных конструкций//Тяжелое машиностроение. - 2008. № 7. С. 9-12.
6. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Доронин С.В. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем // Вычислительные технологии. - 2009. Т. 14. № 6. С. 58-70
7. Матвиенко Ю.Г. Развитие моделей и критериев разрушения в современных проблемах прочности и живучести//Вестник научно-технического развития. - 2014. № 7 (83). С. 9-19.
8. Махутов Н.А., Резников Д.О. Многоуровневая оценка живучести сложных технических систем с учетом масштабно-структурной иерархии процессов накопления повреждений и разрушения//Безопасность в техносфере. - 2016. Т. 5. № 4. С. 3-17. 14.
9. Макаров П.В., Еремин М.О.. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред//Физическая мезомеханика. - 2013, т 16, №1, с.5-26
10. Starossek U., Haberland M. Disproportionate Collapse: Terminology and Procedures. Journal of Performance of Constructed Facilities. - 2010. 24(6), pp.519-528.
11. Baker J.W., M. Schubert, Faber M. H. On the Assessment of Robustness, Journal of Structural Safety, 2008.vol. 30, pp. 253-267.
12. Махутов Н.А., Резников Д.О. Использование сценарного анализа для оценки прочностной надежности сложных технических систем//Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2015. № 1. С. 4-13.
13. Большаков А.М., Захарова М.И. Определение возможных сценариев возникновения, развития и вероятности реализации аварийных ситуаций на резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов при низких температурах эксплуатации//Проблемы анализа риска. - 2012. Т. 9. № 3. С. 22-33.
14. Махутов Н.А., Резников Д.О., Зацаринный В.В. Два типа сценариев аварий в сложных технических системах//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2014. №2. С.28-41.
15. Махутов Н.А., Петров В.П., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Дворецкая Т.Н. Особенности сценарного анализа возникновения и развития техногенных катастроф. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2007. № 3. С. 3-28.

16. Махутов Н.А., Резников Д.О. Оценка уязвимости технических систем и ее место в процедуре анализа риска//Проблемы анализа риска. - 2008. Т. 5. № 3. С. 72-85.

17. Reznikov D.O., Analysis of local failure modes and subsequent scenarios of global failures of complex technical systems, Proc. 19th European Conf. on Future. ECF19, Kazan. - 2012.

Сведения об авторах

Махутов Николай Андреевич, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН). E-mail: safety@imash.ru. Тел. +7(495)930-80-78

Резников Дмитрий Олегович, ведущий научный сотрудник, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН). e-mail: imashreznikoff@yandex.ru, тел. +7 (495) 623 58 35

УДК 614.824(082)

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ УЩЕРБОВ

Доктор техн. наук **Р.С. Ахметханов**

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

Освещены особенности оценки ущерба на КВО при возникновении аварий и техногенных катастроф; рассматриваются все основные аспекты анализа и оценки ущербов - основные соотношения теории риска, опасные и негативные факторы, законы поражения зданий и человека, как основные объекты воздействия опасных и негативных факторов, которые возможны при реализации различных чрезвычайной ситуации, вызванных несанкционированными воздействиями, природными опасными явлениями, исчерпанием ресурса технических систем или ошибками персонала.

Ключевые слова: риски, вероятность, ущерб, опасные факторы, законы разрушения, законы поражения, зона поражения, пробит-функция.

FEATURES OF DAMAGES ASSESSMENT AT RISK ASSESSMENT

Dr. (Tech.) **R.S. Akhmenkhanov**

IMASH RAS

The article is devoted to the peculiarities of damage assessment at the CER in the event of accidents and man-made disasters - all the main aspects of analysis and assessment are considered: the basic ratios of risk theory, dangerous and negative factors, laws of destruction of