

Многоуровневая оценка живучести сложных технических систем с учетом масштабно-структурной иерархии процессов накопления повреждений и разрушения

Н.А. Махутов, главный научный сотрудник, чл.-корр. Российской академии наук, д-р техн. наук,
Д.О. Резников, ведущий научный сотрудник

Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук, канд. техн. наук

e-mail: mibsts@mail.ru, ImashReznikoff@yandex.ru

Ключевые слова:

безопасность технических систем, прочность, структурная целостность, живучесть, стойкость, разномасштабные модели, повреждение, разрушение.

Обеспечение живучести, определяемой как способность технической системы, находящейся в поврежденном состоянии, выполнять (полностью или частично) свои функции и не допускать катастрофических разрушений, является важным элементом комплексной проблемы обеспечения безопасности объектов техно-сферы. В статье рассмотрены основные подходы к проведению количественной оценки живучести сложных технических систем с учетом того, что процессы накопления повреждений и разрушения развиваются по широкому спектру масштабно-структурных уровней, начиная от наномасштабов, соизмеримых с межатомными расстояниями, вплоть до макроскопического масштаба, определяемого структурой системы в целом. Из всей иерархии масштабов выделены три базовых масштабно-структурных уровня, позволяющих описать развитие процессов разрушения, и предложена совокупность показателей, характеризующих живучесть систем на выделенных масштабных уровнях. В статье сопоставлены основные подходы к проведению количественной оценки живучести технических систем, в том числе, основанные на детерминистических и вероятностных оценках остаточной прочности системы после возникновения макроповреждений, а также интегральные подходы, базирующиеся на проведении риск-анализа системы и на оценке снижения ее определяющих прочностных характеристик при варьировании степени повреждения системы.

1. Введение

Безопасность сложных технических систем (далее — СТС) в значительной степени определяется их конструкционной прочностью и способностью сохранять свою структурную целостность при различных режимах нагружения. Различают два базовых подхода к обеспечению конструкционной прочности и структурной целостности СТС [1].

1. Создание систем, которые способны функционировать при наличии локальных повреждений (принцип безопасности повреждения, англ. fail-safe

design). При этом указанные локальные повреждения должны идентифицироваться в ходе проведения инспекций и устраняться путем ремонта и замены. Кроме того, создание подобных систем предполагает введение определенной избыточности (резервных связей), чтобы после возникновения локального повреждения имелся альтернативный путь передачи нагрузки и временной запас, необходимый для устранения повреждения.

2. Создание систем, практически гарантированных от возникновения критических локальных по-

вреждений в течение установленного срока эксплуатации (принцип безопасного ресурса, англ. safe-life design). Этот подход реализуется в таких системах, как спутники или подводные конструкции, которые невозможно инспектировать и ремонтировать в процессе эксплуатации. Подобные системы проектируются и изготавливаются с высоким начальным запасом по основным механизмам достижения предельных состояний и подвергаются тщательному контролю до их ввода в эксплуатацию.

Второй подход чрезвычайно затратный и имеет ограниченную область применения. В большинстве случаев (иногда в неявной форме) используется первый подход, который предполагает эксплуатацию технических систем, получивших определенную степень повреждения. Ключевым при реализации этого подхода выступает понятие живучести системы (допустимости повреждения, англ. damage tolerance), которое характеризует ее способность выполнять свои функции при наличии повреждений.

Традиционные методы проектирования СТС предполагают расчет реакции элементов систем на проектные воздействия, которые определяются, исходя из нормальных условий эксплуатации. Ввиду высокого уровня вариативности основных механических свойств конструкционных материалов и действующих нагрузок оценка конструкционной прочности и структурной целостности СТС должна быть вероятностной. В связи с этим вводится понятие прочностной надежности системы Re_{sys} , под которой понимается вероятность неразрушения системы под действием расчетных режимов эксплуатационного нагружения [2, 3].

При оценках прочностной надежности, как правило, не учитываются запроектные воздействия на систему (нерасчетные режимы нагружения, ошибки операторов, экстремальные условия внешней среды), которые с высокой вероятностью вызывают повреждения системы на различных масштабных уровнях (в том числе макроповреждения), способные инициировать разрушение системы в целом. Это объясняет, что фактическая вероятность отказов сложных систем P_F^Φ оказывается на порядок выше расчетных оценок P_F^R , полученных методами теории надежности: $P_F^\Phi \sim 10 P_F^R$ [4, 5]. Поскольку при оценке прочностной надежности из рассмотрения выводятся запроектные воздействия и не исследуется реакция системы на них, оценка прочностной надежности системы должна быть дополнена оценкой ее живучести, в рамках которой детально исследуются свойства системы, получившей различного рода повреждения.

Обеспечение живучести является одним из ключевых элементов комплексной задачи по обеспечению защищенности объектов техносферы. В исторической ретроспективе решение этой задачи осуществляется поэтапно и представляет собой последовательную постановку и поиск решения задач прочности R_σ , ресурса $R_{N,\tau}$, надежности $P_{P,R}$, живучести $L_{l,d}$, безопасности S , риска R и защищенности Z_R :

$$R_\sigma \rightarrow R_{N,\tau} \rightarrow P_{P,R} \rightarrow L_{l,d} \rightarrow S \rightarrow R \rightarrow Z_R.$$

При этом каждый элемент этой цепочки, представляющий собой этап развития науки и техники, опирается и использует в обязательном порядке предыдущие.

В общем случае под живучестью системы 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 СТС, 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. К источникам прочностной живучести относятся: физико-механические свойства конструкционных материалов, позволяющие системе сопротивляться деформированию и разрушению; заложенный в систему запас прочности по различным механизмам достижения предельных состояний; наличие в системе структурной избыточности и альтернативных путей передачи нагрузки [6–13].

Понятие прочностной живучести системы центральное при анализе ее поведения после того как в ней возникают локальные повреждения. Системы, обладающие большой 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 первичному ущербу от повреждения элементов системы. Системы с малой живучестью разрушаются резко и катастрофически, что сопровождается как значительными вторичными и каскадными разрушениями, несоизмерными (непропорциональными) инициирующим воздействиям, так и вызванными ими первичными повреждениями. Накопление повреждений и разрушение

СТС представляет собой иерархически организованный процесс, который развивается по всей иерархии масштабов, начиная от наномасштабов, соизмеримых с межатомными расстояниями, вплоть до макроскопического масштаба, определяемого структурой системы в целом.

На основании моделей и подходов, 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 обеспечения адекватных результатов моделирования процессов накопления повреждений и разрушения, а в ряде случаев и для получения достаточно точных количественных оценок, явный одновременный учет всего множества масштабов избыточен и для описания указанных процессов вполне достаточно трех масштабно-структурных уровней [14, 15] (рис. 1).

- Мезоуровень интегрально учитывает более мелкие масштабы и характеризует физико-механические свойства конструкционного материала.

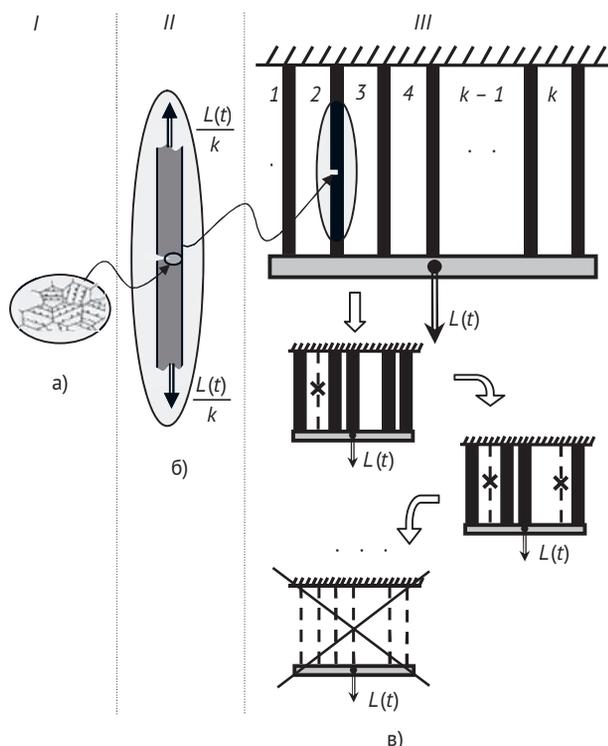


Рис. 1. Масштабно-структурные уровни процесса накопления повреждений и разрушения системы: а) мезомасштабный уровень (I); б) макромасштабный уровень разрушения конструктивных элементов (II); в) макромасштабный уровень разрушения системы (III)

Снизу мезоуровень задается минимальным объемом структурно-неоднородного материала, который можно наделить осредненными свойствами макрообъема. Для тела с трещиной мезоуровень определяется зернистостью материала в окрестности трещины.

- Макроуровень описывает процессы накопления повреждений и разрушение отдельных конструктивных элементов с учетом макродефектов (элементный уровень).
- Макроуровень характеризует последовательность разрушения в сопряженных элементах и системе в целом (системный уровень). В простейшей постановке полагается, что элементы СТС могут находиться в двух дискретных состояниях: «неповрежденном» и «разрушенном».

В простейшей постановке при современных методах технической диагностики (металлография, дефектоскопия, дефектометрия) можно ограничиться рассмотрением процессов разрушения на трех масштабных уровнях: 1) мезоуровне — накопление 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 уровнями могут быть сформированы три уровня оценки живучести: 1) живучесть (стойкость) конструкционного материала; 2) живучесть конструктивных элементов системы; 3) структурная живучесть системы в целом.

2. Живучесть конструкционного материала

Под живучестью (стойкостью) конструкционного материала понимается его способность полностью или частично сохранять свои физико-механические свойства и сопротивляться деформированию и разрушению при наличии деградационных повреждений различной природы (усталостных, радиационных, коррозионных и др.). Иными словами, стойкость материала в процессе развития деградационных процессов определяется стабильностью характеристик:

- диаграмм статического деформирования (предел текучести σ_T , предел прочности σ_b , истинное сопротивление разрыву в шейке S_K , предельная пластическая деформация e_C , модуль упругости m , предельная пластичность ψ_{max});

- диаграмм циклического деформирования (размах напряжений $S_{\max}^{(k)}$ в полуцикле k , ширина петли гистерезиса $\delta^{(k)}$, односторонне накопленная деформация за полуцикл $\Delta^{(k)}$);
- диаграмм усталости (предел выносливости σ_{-1} , тангенс угла наклона левой ветви кривой усталости α);
- ударной вязкости KCV ;
- характеристик механики разрушения (трещиностойкостью K_{IC});
- коррозионной, радиационной, химической стойкостью.

В такой постановке перечисленные характеристики следует рассматривать не как постоянные материала, а как функции от накопленной им степени повреждения D . При этом живучесть (стойкость) конструкционного материала может оцениваться на основании лабораторных испытаний стандартных образцов, в ходе которых будет фиксироваться снижение указанных характеристик при увеличении степени повреждения материала. В зависимости от того, какая из характеристик выбрана для оценки, могут быть предложены различные показатели живучести/стойкости конструкционного материала: силовые, деформационные, жесткостные, энергетические и т. д.

Пусть конструкционный материал получил (например, в случае предварительного циклического нагружения) определенную степень повреждения $d_* = N_{\text{Э}}/N_C = 0,25$, где $N_{\text{Э}}$ и N_C соответственно количество фактических циклов нагружения и циклов нагружения до разрушения при амплитуде напряжений σ_a . Тогда для рассматриваемой степени повреждения материала может быть предложен ряд точечных индексов живучести.

- Силовой индекс живучести материала, характеризующий снижение остаточной прочности материала при фиксированной степени повреждения d_* :

$$\lambda_{\sigma} = \sigma_C(D = d_*) / \sigma_C(D = 0). \quad (1)$$

Причем значение индекса λ_{σ} будет варьировать в интервале от 0 до 1 (для абсолютно живучего материала $\lambda_{\sigma} \rightarrow 1$, а в случае нулевой стойкости $\lambda_{\sigma} \rightarrow 0$).

- Деформационный индекс стойкости материала, описывающий снижение способности поврежденного материала претерпевать пластические деформации до разрушения:

$$\lambda_e = e_C(D = d_*) / e_C(D = 0). \quad (2)$$

Аналогично могут быть введены индексы, характеризующие снижение модуля упругости материала, трещиностойкости, ударной вязкости и т. д.:

$$\lambda_E = E(D = d_*) / E(D = 0), \quad (3)$$

$$\lambda_{K_{IC}} = K_{IC}(D = d_*) / K_{IC}(D = 0), \quad (4)$$

$$\lambda_{KCV} = KCV(D = d_*) / KCV(D = 0). \quad (5)$$

Точечные индексы живучести могут быть использованы, когда известна степень повреждения, которую получил материал. В иных случаях может быть предложен интегральный подход к определению стойкости материала, описывающий снижение механических свойств материала при варьировании степени его повреждения от $D = 0$ (состояние неповрежденного материала) до $D = 1$ (состояние полного разрушения).

При этом в качестве интегрального показателя живучести используется площадь под кривой деградации механических свойств материала $\lambda(D)$:

$$St_I = \int_{D=0}^{D=1} \lambda(D) dD, \quad (6)$$

где $\lambda(D) = \zeta(D = d) / \zeta(D = 0)$ — отношение выбранной характеристики механических свойств поврежденного ($D = d$) и неповрежденного ($D = 0$) материала. В зависимости от доминирующего механизма разрушения в качестве характеристики механических свойств материала ζ могут использоваться различные переменные: предел прочности σ_b , предельная пластическая деформация e_C , предел трещиностойкости K_{IC} , и др. Зависимость $\lambda(D)$, характеризующую снижение механических характеристик материала при накоплении им повреждений, можно назвать профилем живучести (стойкости) материала. Следует отметить, что совокупность профилей живучести, при построении которых в качестве характеристической переменной ζ выбираются стандартные (предел текучести σ_T , предел прочности σ_b , модуль упругости E , предел выносливости σ_{-1} , трещиностойкость K_{IC}) и дополнительные (модуль упрочнения G , истинное сопротивление разрыву S_k) механические свойства материала, будет наиболее полно описывать его стойкость в процессе деградации и накопления рассеянных повреждений.

Как и в случае точечных индексов, интегральный индекс живучести материала St_I будет варьировать в интервале от 0 до 1 (для абсолютно живучего материала $St_I \rightarrow 1$, а в случае нулевой живучести $St_I \rightarrow 0$). Например, отношение остаточной прочности σ_C по-

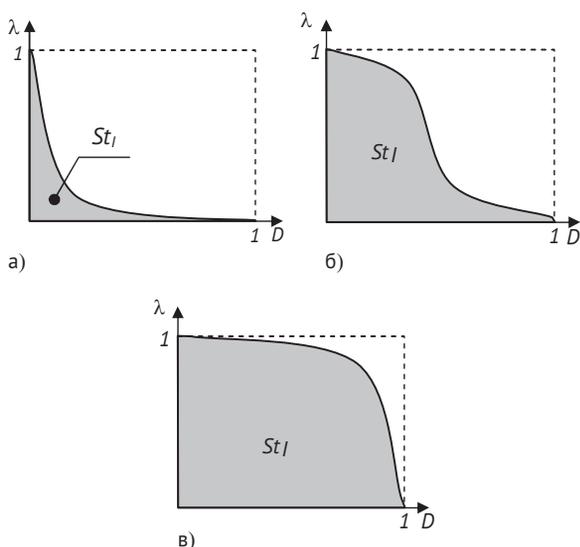


Рис. 2. Профили живучести материала
а) низкий уровень живучести; б) средний уровень живучести;
в) высокий уровень живучести

врежденного ($D = d$) и неповрежденного ($D = 0$) материала $\lambda_\sigma = \sigma_c(D = d) / \sigma_c(D = 0)$. Тогда:

$$St_{I,\sigma} = \int_{D=0}^{D=1} \frac{\sigma_c(D=d)}{\sigma_c(D=0)} dD. \quad (7)$$

При этом показатель живучести $St_{I,\sigma}$ становится интегральной характеристикой остаточной прочности поврежденного материала.

Аналогично могут быть введены другие интегральные индексы живучести материала:

$$St_{I,e} = \int_{D=0}^{D=1} \frac{e_c(D=d)}{e_c(D=0)} dD, \quad (8)$$

$$St_{I,e} = \int_{D=0}^{D=1} \frac{E(D=d)}{E(D=0)} dD, \quad (9)$$

$$St_{I,K_{Ic}} = \int_{D=0}^{D=1} \frac{K_{Ic}(D=d)}{K_{Ic}(D=0)} dD,$$

$$St_{I,KCV} = \int_{D=0}^{D=1} \frac{KCV(D=d)}{KCV(D=0)} dD. \quad (10)$$

При этом следует иметь в виду, что наиболее полную живучесть материала определяют не точечные оценки по выражениям (1)–(5) или интегральные оценки вида (7)–(10), а сами характеристики $\lambda(D)$,

называемые профилями живучести, которые описывают деградацию механических свойств при накоплении рассеянных микрповреждений материала.

Значения стойкости конструкционного материала к действию различных режимов термомеханического нагружения и воздействию агрессивных сред определяют вид соответствующих функций предельных состояний и являются определяющими параметрами при проведении дальнейшей оценки живучести системы на более высоких масштабно-структурных уровнях.

3. Оценки живучести при проведении сценарного анализа разрушений СТС на макромасштабном уровне

Функционирование сложной технической системы может, как правило, быть представлено в виде траектории S_0 в пространстве состояний, называемой сценарием успеха, призванным обеспечить переход из исходного состояния HC в заданное конечное состояние KC_0 . В ходе эксплуатации системы под действием различных режимов термомеханического нагружения, воздействием агрессивных сред и т. д. (H_1, H_2, \dots, H_n) ее отдельные элементы могут достигать предельных состояний ЛПС $_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), каждое из которых может инициировать последовательность неблагоприятных событий, составляющих сценарий разрушения системы (рис. 3). Подобные сценарии представляют собой процессы, реализующиеся на двух макромасштабных уровнях.

1. Возникновение и развитие макроповреждений (макротрещины, зоны локализации пластических деформаций, зоны локальной потери устойчивости/гофры, очаги коррозионных поражений) элементов СТС, достижение ими локальных предельных состояний и разрушение элементов (локальный уровень — инициация катастрофы).

2. Эскалация аварии, когда вслед за разрушением отдельного элемента(ов) системы происходит перераспределение нагрузок, изменение напряженно-деформированного состояния системы и запускается последовательность разрушений других элементов при возрастающих нагрузках и, следовательно, вероятностях разрушения продолжающих работать элементов (структурный уровень — эскалация катастрофы).

Необходимо отметить, что ввиду высокой неопределенности относительно интенсивности режимов эксплуатационного нагружения, структуры, механических свойств конструкционных материалов и геометрических параметров конструктивных элементов рассматриваемой системы процесс накопления

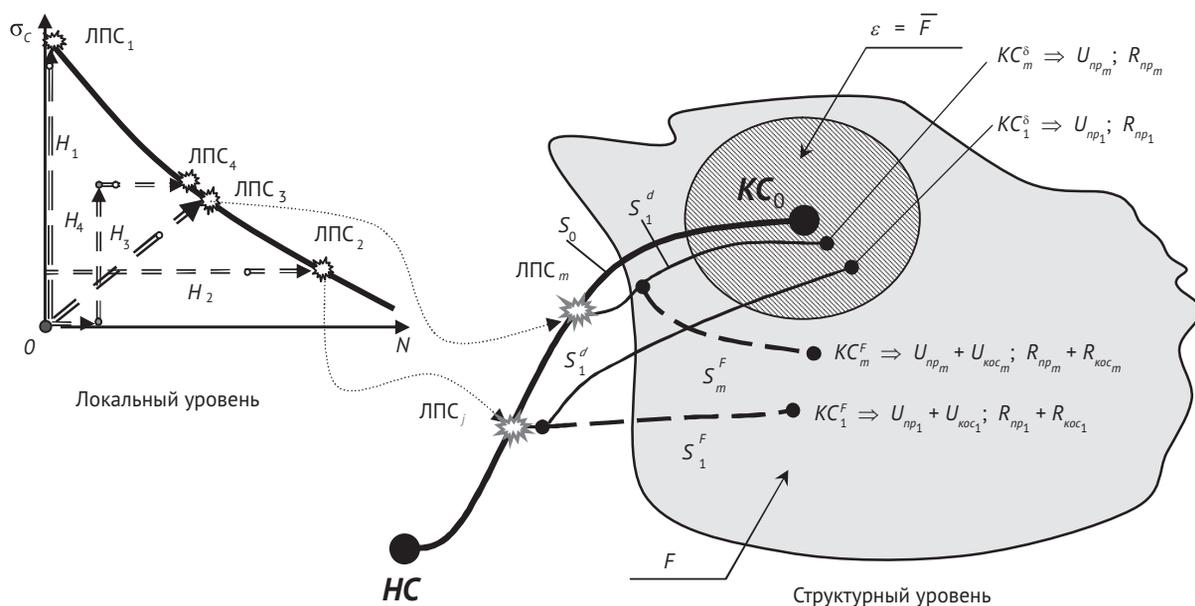


Рис. 3. «Дерево» сценариев, иллюстрирующее процесс разрушения системы на макромасштабном уровне

Область допустимых конечных состояний системы ε и область разрушений F , KC_j^δ – конечные состояния, находящиеся в допустимой области, KC_j^F – конечные состояния, находящиеся в области разрушений, S_j^δ и S_j^F – сценарии реализации допустимых конечных состояний и сценарии разрушения

повреждений и разрушения должен анализироваться в сценарной вероятностной постановке [3, 15, 16].

Как было отмечено ранее, в соответствии с рассмотренными уровнями реализации процессов разрушения могут быть сформированы два уровня оценки живучести на макромасштабном уровне: локальный (элементный) и структурный/глобальный.

3.1. Живучесть конструктивных элементов системы

Конструктивные элементы технических систем в процессе эксплуатации подвергаются комбинированному воздействию повреждающих факторов (механических, температурных, радиационных, химических воздействий агрессивных сред), которые составляют режимы нагружения $H_i (i = 1, 2, \dots, n)$. Вследствие их действия в наиболее нагруженных зонах наряду с общей деградацией структуры материала возможно возникновение макродефектов (макротрещин, областей локальных пластических деформаций, зон локальной потери устойчивости и т. д.), развитие которых может привести к достижению локальных предельных состояний различного типа ЛПС_j ($j = 1, 2, \dots, m$) и разрушению элемента.

Эти предельные состояния образуют поверхность локальных предельных состояний (рис. 4а) [15, 16]. В зависимости от свойств конструкционных матери-

алов, размеров конструктивных элементов и характера режима нагружения катастрофический отклик системы на комбинированное воздействие силовых факторов и среды может иметь характер хрупкого, квазихрупкого и вязкого разрушения. Конструктивные элементы, выполненные из хрупких материалов, разрушаются практически мгновенно в момент образования макродефектов. Элементы из квазихрупких и вязких материалов способны воспринимать нагрузку при образовании и росте макродефектов, разрушение в этом случае более длительный процесс, который можно отслеживать, контролировать и блокировать. При этом живучесть конструктивного элемента будет определяться возможностями средств технической диагностики и ремонта.

В случае накопления микрповреждений и возникновения в конструктивном элементе макроповреждений (макротрещин, областей местных пластических деформаций, зон локальной потери устойчивости/гофров, очагов коррозионного поражения) его способность воспринимать нагрузки и сопротивляться деформированию и разрушению будет снижаться. Под прочностной живучестью конструктивного элемента (живучестью на элементном уровне СТС) будет пониматься его способность сохранять, по крайней мере, частично свою несущую способность в течение некоторого времени (циклов

нагрузки) после возникновения микро- и макроповреждений различного типа.

Будем считать степень повреждения конструктивного элемента D_3 функцией двух обобщенных параметров:

$$D_3 = F(d, \delta),$$

где: d — накопленный уровень рассеянных повреждений конструкционного материала, определяемый, например, отношением числа циклов нагружения N_3 к числу циклов до идентификации макродефектов N_c ; δ — уровень накопленных макроповреждений, характеризующийся относительным размером, количеством, ориентацией и месторасположением макродефектов.

В зависимости от длительности нагружения τ , числа циклов нагружения N , размера дефектов l и температуры t могут рассматриваться различные механизмы накопления повреждений и достижения предельных состояний (рис. 4а и 4б).

1) Механизмы разрушения при перегрузках (механизмы типа 1) в начальной стадии деформации ($\tau = \tau_0 = 0$) обусловлены экстремальными воздействиями, которые могут вызывать разрушение при малой исходной степени повреждения материала. При рассмотрении механизмов инициации макроповреждений и достижения предельных состояний, обусловленных перегрузками, исходят из того, что в максимально нагруженном объеме достигается предельное состояние ($\sigma_{\max} = \sigma_c$, $e_{\max} = e_c$) в момент, когда нагрузка Q окажется выше предельной несущей

способности Q_c : $Q > Q_c$. В такой постановке считается, что нагрузки интенсивностью ниже предельного уровня $Q < Q_c$ не оказывают необратимого влияния на систему (ее несущую способность). В этом случае разрушение трактуется как первый предельный выброс из области защищенных (допускаемых) состояний, а история эксплуатационного нагружения при $\tau < \tau_0$ при этом не учитывается.

2) Кумулятивные деградационные механизмы разрушения (усталость, износ, ползучесть, коррозия, эрозия) обусловлены непостоянством Q и постепенным накоплением повреждений $d(\tau, N)$ материала в мезообъеме, возникновением и ростом макродефектов. В процессе эксплуатации системы происходят снижение предельной несущей способности Q_c и достижение предельных состояний на локальном и глобальном уровне (механизмы типа 2), при которых разрушение наступает при проектных (ординарных) воздействиях на систему при $N = N_c$ ($\tau = \tau_c$ или $t = t_c$). В этом случае допускаемый циклический ресурс будет $[N]$.

3) Накопление повреждений $d(\tau, N)$ может ускорить переход к предельному состоянию по линии 3, соответствующей реализации форсированного режима нагружения.

4) При эксплуатации возможна реализация программных режимов нагружения с экстремальными перегрузками Q_Φ и деформациями $[e_\Phi]$ по сценарию 4.

Особенность конструктивных элементов, материал которых находится в хрупком состоянии, — их склонность к разрушению при образовании макродефектов (рис.4б) [17]. В этом случае поверхность инициации

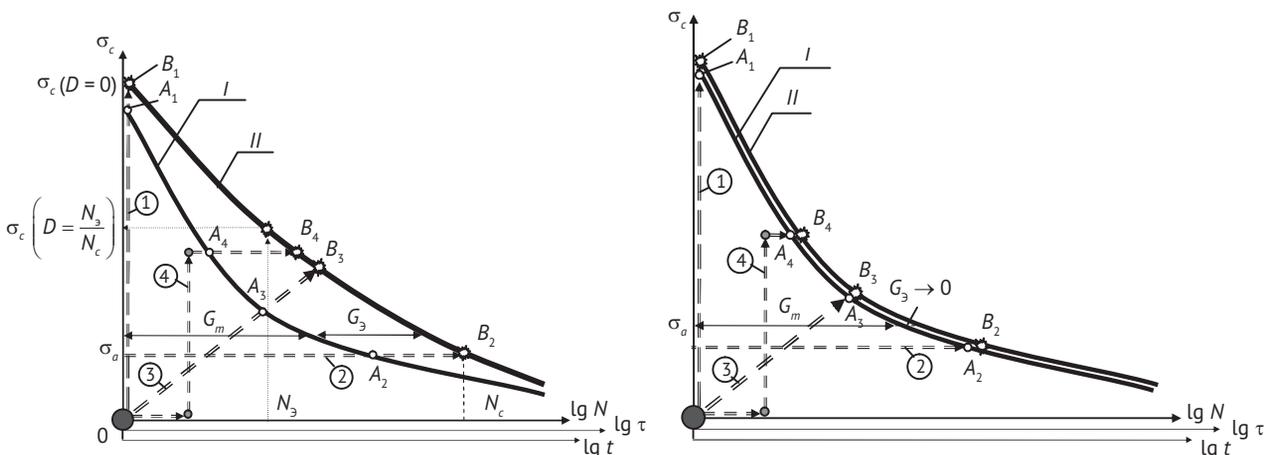


Рис. 4. Механизмы инициации макроповреждений и достижения предельных состояний элементов СТС:

а) из квазихрупких и вязких материалов; б) из хрупких материалов

G_m — этап живучести материала, G_3 — этап живучести элемента, содержащего макродефект, I — поверхность инициации макродефектов, II — поверхность предельных состояний (разрушения) элемента, (A_1, A_2, A_3, A_4) и (B_1, B_2, B_3, B_4) — соответственно точки инициации макроповреждений и достижения локальных предельных состояний элемента СТС в режимах нагружения 1, 2, 3, 4

макротрещины (I) и поверхность предельных состояний элемента (II) практически сливаются.

Уровень живучести конструктивного элемента может оцениваться путем сопоставления характеристик остаточной прочности, пластичности, жесткости поврежденного и неповрежденного элемента по выражениям, аналогичным уравнениям (1)–(5) для двух расчетных случаев поврежденных состояний элемента: накопились микрповреждения материала элемента без образования макротрещин; наряду с накоплением микрповреждений произошла инициация макрповреждений конструктивного элемента.

Живучесть конструктивного элемента будет определяться стойкостью материала к накоплению микрповреждений и инициации макрповреждений, а также способностью элемента сопротивляться развитию макрповреждений, с учетом накопленной степени повреждения материала на нано-, микро- и мезомасштабном уровнях. Для первого расчетного случая оценка живучести конструктивного элемента может базироваться на использовании представленных в разделе 2 точечных индексов живучести конструктивного материала по выражениям (1)–(5) или интегральных показателей живучести по выражениям (7)–(10). Для второго расчетного случая необходимо отдельно решать задачи по оценке проч-

ности, жесткости, устойчивости конструктивного элемента, содержащего макротрещину (рис. 5), гофр (рис. 6) и т. д. Решение подобных задач осуществляется методами теории упругости, теории пластичности, механики накопления повреждений и механики разрушения. При этом необходимо учитывать накопленный уровень повреждения материала конструктивного элемента в окрестности макротрещины, изменение напряженно-деформированного состояния элемента после инициации макротрещины, эффекты концентрации напряжений и деформаций и проявление масштабного фактора.

В дополнение к указанным может быть введен временной показатель живучести конструктивного элемента:

$$L_T = 1 - t_{cr} / t_f,$$

где: t_{cr} — промежуток времени от начала эксплуатации до момента, когда возникающий макротрещина может быть обнаружен имеющимися средствами неразрушающего контроля; t_f — время до разрушения. Показатель L_T варьирует в диапазоне от 0 (нулевая живучесть) до 1 (абсолютная живучесть) и характеризует резерв времени, который имеется на то, чтобы предпринять необходимые действия по ремонту или замене поврежденного элемента.

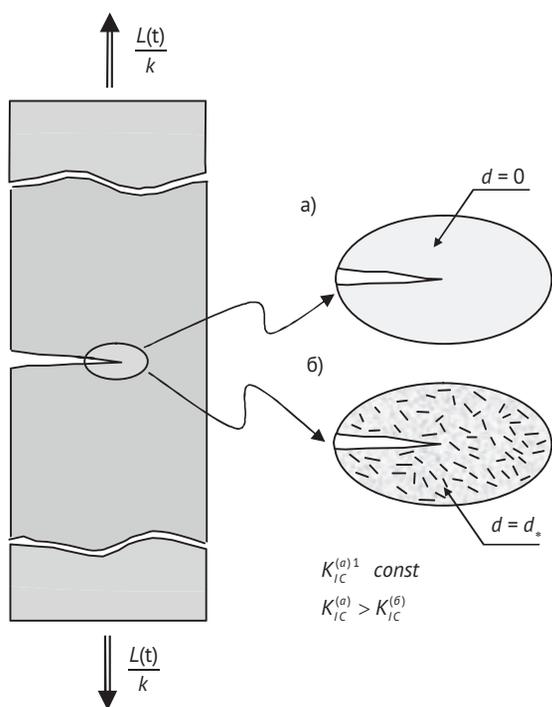


Рис. 5. Макротрещина в виде магистральной трещины

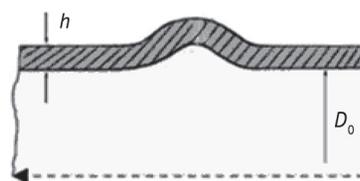


Рис. 6. Макротрещина в виде гофра

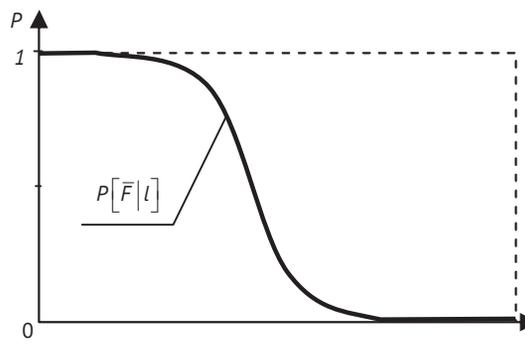


Рис. 7. Функция живучести конструктивного элемента

Оценка живучести конструктивного элемента может быть проведена в вероятностной постановке. В этом случае в качестве показателя живучести конструктивного элемента будет пониматься условная вероятность того, что элемент, находящийся под действием проектных режимов нагружения, не будет разрушен в течение заданного срока его эксплуатации, если в нем будет инициировано макроповреждение MD :

$$L_p = P(\bar{F} | MD), \quad (11)$$

где $P(F | MD)$ — условная вероятность разрушения элемента, если в нем инициируется макродефект.

В более общей постановке может вводиться функция живучести конструктивного элемента, определяющая условную вероятность того, что рассматриваемый элемент, который подвергается проектному режиму нагружения, не разрушится в течение заданного срока эксплуатации, если в элементе будет инициирован макродефект с характерным размером l :

$$L_p(l) = P(\bar{F} | l). \quad (12)$$

В связи с тем, что помимо размера макродефекта на развитие процессов разрушения будет влиять накопленный уровень микроповреждений материала d , функция живучести (12) может быть уточнена:

$$L_p(l) = P(\bar{F} | l, d).$$

В качестве косвенных показателей живучести конструктивных элементов могут рассматриваться запасы по различным механизмам достижения предельных состояний [6]:

$$\sigma_n^3 = \varphi(Q_{\max}^3 / F) = [\sigma_n] = \left\{ \frac{\sigma_b}{n_b}; \frac{\sigma_T}{n_T}; \frac{\sigma_{-1}}{n_{\sigma}}; \frac{\sigma_{\text{вт}}}{n_{\text{вт}}} \right\},$$

где: σ_n^3 — номинальное напряжение от максимальных нагрузок Q_{\max}^3 в нормальных условиях эксплуатации; F — площадь сечения; $[\sigma_n]$ — номинальное допускаемое напряжение; $n_b, n_T, n_{\sigma}, n_{\text{вт}}$ — запасы прочности (по пределам прочности σ_2 , текучести σ_T , выносливости σ_{-1} и длительной прочности $\sigma_{\text{вт}}$). При этом, когда можно допустить наличие монотонно возрастающей функциональной зависимости между запасом n_i по i -му механизму достижения предельных состояний и вероятностью неразрушения неповрежденного элемента по указанному механизму $P(\bar{F}_i)$ вида $n_i = \varphi(P(\bar{F}_i))$ [21, 22], то можно утверждать, что и для

поврежденного элемента вероятность его неразрушения $P(\bar{F}_i | l, d)$ будет тем выше, чем больший начальный запас n_i был установлен.

3.2. Живучесть системы на структурном уровне

Достижение предельного состояния и разрушение одного из (или нескольких) конструктивных элементов не означает обязательное и практически мгновенное разрушение системы в целом (рис. 3). Ввиду наличия избыточных связей и альтернативных путей передачи усилий воздействия, которые воспринимались разрушенным элементом, могут быть перераспределены на оставшиеся элементы, что в свою очередь может инициировать последовательность их разрушений и переход к магистральному макроповреждению. При этом состоявшееся достижение локального предельного состояния ЛПС $_j$ будет инициирующим событием, при котором происходят отклонение траектории системы от заданного сценария успеха S_0 и «запуск» сценария разрушения S_p , приводящего систему в поврежденное состояние $KC_i (i = 0, 1, 2, \dots, q)$ с ущербом U и с изменением параметров повреждаемости $d(\tau, N)$, сопротивления квазиупругому деформированию $E^3(\tau, N)$.

Наиболее полной характеристикой структурной живучести системы является ее сценарный граф, а точнее, его часть, которая описывает события, происходящие после возникновения локальных повреждений, и характеризует реакцию системы на разрушение отдельных элементов. Анализ живучести на системном уровне предполагает исследование последовательности событий и причинно-следственных связей между ними, происходящими вслед за локальными повреждениями вплоть до достижения системой конечных состояний. Иными словами, анализ живучести системы заключается в проведении качественного и количественного исследования структуры сценариев эскалации аварии.

В качестве определяющих параметров, характеризующих прочностную живучесть как свойство технической системы сохранять работоспособное состояние после разрушения одного или нескольких элементов, могут быть использованы характеристики прочности, структурной целостности, жесткости, надежности и риска [15]. До настоящего времени не разработана унифицированная методология, позволяющая с единых позиций производить оценку живучести технических систем и нормативные показатели, которые должны обеспечиваться при проектировании. Однако были сформированы четыре основных подхода к решению задачи, в рамках которых были предложены соответствующие показатели живучести [9, 10, 18–22].

1) Детерминистский подход. В рамках этого подхода используются показатели, формирующиеся на основе сопоставлении различных (силовых, жестких, энергетических) детерминированных параметров системы в неповрежденном и поврежденном состояниях. В частности, живучесть может оцениваться исходя из силового критерия как отношение разрушающих нагрузок поврежденной ($Q_{F|D}$) и неповрежденной $Q_{F|\bar{D}}$ системы [18]:

$$L_Q = \frac{Q_{F|D}}{Q_{F|\bar{D}}}. \quad (13)$$

В более общей постановке, учитывающей множественность возможных повреждений (D_1, D_2, \dots, D_n), показатель живучести может быть определен как минимум отношения нагрузки $Q_{F|D_i}$, необходимой для разрушения системы, если система уже предварительно получила повреждение D_i (разрушение i -го элемента), к величине нагрузки $Q_{F|\bar{D}}$, необходимой для разрушения неповрежденной системы:

$$L_Q = \min_i \left(\frac{Q_{F|D_i}}{Q_{F|\bar{D}}} \right). \quad (14)$$

Рассматриваемая система считается живучей при $L_Q \rightarrow 1$. В рамках детерминистского подхода были предложены другие подобные показатели живучести, основанные на сравнении матриц жесткости неповрежденной и поврежденной систем. Детерминистская модель живучести системы лежит в основе механики катастроф, в рамках которой исследуются процессы накопления повреждений, достижения предельного (критического) состояния. Особое место в механике катастроф занимает изучение процесса закритического поведения элементов конструкций, они выходят из строя и оказывают влияние на другие элементы системы, порождая внутренние для самой конструкции негативные воздействия. Внешние и внутренние воздействия приводят к последовательности отказов элементов системы, инициирующих ее переход в аварийное состояние. Принципиальный недостаток детерминистского подхода к оценке оценки живучести заключается в том, что при его использовании не учитывается стохастическая природа характеристик механических свойств материалов и внешних нагрузок.

2) Вероятностный подход. В рамках этого подхода используются показатели, основанные на соотношении вероятностей разрушения $P(F)$ (или показателей

надежности β) неповрежденной и поврежденной систем [7]:

$$L_p = \frac{P(F|\bar{D})}{P(F|D)}. \quad (15)$$

Если $P(F|\bar{D}) = P(F|D)$, то система абсолютно живучая ($L_p = 1$). Если $P(F|\bar{D}) \ll P(F|D)$, то $L_p \rightarrow 0$ и система абсолютно неживучая. Если в системе возможны множественные локальные повреждения D_1, D_2, \dots, D_n , то показатель живучести может быть записан в виде:

$$L_p = \min_{i=1, \dots, n} \frac{P(F|\bar{D})}{P(F|D_i)}. \quad (16)$$

Данный показатель сложно использовать на практике из-за трудности вычисления вероятности разрушения системы, а также широкого диапазона возможных значений вероятности, что осложняет сравнительный анализ проектных решений. Этот недостаток преодолевается при использовании индекса надежности β , который напрямую связан с вероятностью разрушения: $\beta = \Phi^{-1}(P_F)$, где Φ^{-1} — функция, обратная нормированной функции Лапласа.

Рассмотрим величину резерва несущей способности $M_D = g_D(\mathbf{X}) = R_D - Q$, равную превышению несущей способности над нагрузкой. Поскольку r и q случайные величины, то M также случайная величина, имеющая математическое ожидание μ_M и среднеквадратическое отклонение σ_M . Их можно вычислить по математическим ожиданиям μ_R, μ_Q среднеквадратическим отклонениям σ_R, σ_Q величин R и Q :

$$\mu_M = \mu_R - \mu_Q. \quad (17)$$

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2 - 2\rho_{RQ}\sigma_R\sigma_Q}, \quad (18)$$

где ρ_{RQ} — коэффициент корреляции между величинами R и Q .

Далее подсчитывается показатель надежности неповрежденной системы $\beta_D = \mu_M / \sigma_M$.

Аналогичным образом может быть рассчитан показатель надежности β_D для системы, получившей локальное повреждение D . Для этого строится функция предельных состояний поврежденной системы $\lambda_D(\mathbf{X}) = R_D - Q$ и определяется резерв несущей способности M_D для поврежденной системы (здесь R_D — несущая способность поврежденной системы после

перераспределения нагрузок в результате локального повреждения D). Затем подсчитываются математическое ожидание μ_{M_D} и среднее квадратическое σ_{M_D} запаса. После чего может быть подсчитан показатель надежности β_D для поврежденной системы $\beta_D = \mu_{M_D} / \sigma_{M_D}$. Тогда индекс живучести по показателю надежности определяется соотношением:

$$L_\beta = \frac{\beta_D}{\beta_{\bar{D}}} \quad (19)$$

Величина L_β варьирует в пределах от 0 до 1, причём для живучих систем $L_\beta \rightarrow 1$.

3) Интегральный подход, описывающий функциональные характеристики системы при варьировании степени ее повреждения от $D = 0$ (неповрежденная система) до $D = 1$ (полное разрушение системы). В простейшей постановке при исследовании сценариев разрушения на общесистемном уровне будем считать, что элементы СТС могут находиться в двух дискретных состояниях: «неповрежденном состоянии» и «состоянии разрушения». Тогда степень повреждения системы на структурном уровне будет дискретной величиной, характеризующей отношение количества разрушенных элементов к общему количеству элементов системы. Однако далее при достаточно большом числе элементов ее можно условно считать непрерывной.

При этом в качестве интегрального показателя живучести используется площадь под кривой функциональной характеристики $f(D)$ (рис. 8), где D — степень повреждения системы [13]:

$$L_f = \int_{D=0}^{D=1} f(D) dD \quad (20)$$

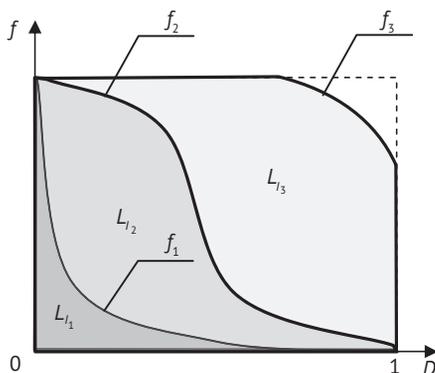


Рис. 8. Зависимость функциональной характеристики системы от уровня ее повреждения ($L_{f_1} < L_{f_2} < L_{f_3}$ — возрастание живучести систем)

В качестве функциональной характеристики f могут использоваться разные переменные. Например, отношение разрушающих нагрузок поврежденной и неповрежденной систем:

$$f(D) = \frac{Q_F(D=d)}{Q_{\bar{F}}(D=0)} \quad (21)$$

При этом показатель живучести $L_{f, Q}$ становится интегральной характеристикой несущей способности поврежденной системы. В качестве функциональной характеристики системы при различной степени ее повреждения может использоваться отношение вероятности разрушения неповрежденной и поврежденной систем

$$f(D) = \frac{P_F(D=0)}{P_F(D=d)}$$

В этом случае показатель живучести L_{f, P_F} становится интегральной характеристикой вероятности разрушения поврежденной системы.

4) Подход, базирующийся на проведении риск-анализа конструкции. Наиболее полно многовариантность сценариев разрушения системы может быть учтена с помощью индекса живучести, базирующегося на риске (рис. 9). При этом должны быть разграничены [20]:

а) первичный/прямой ущерб U_{np} и риски R_{np} , которые непосредственно связаны с локальными повреждениями элементов системы в результате экстремальных иницирующих воздействий;

б) вторичный/каскадный/косвенный/ ущерб U_{koc} и риски R_{koc} , которые возникают в случае реализации сценария аварии и обусловлены разрушением системы в целом.

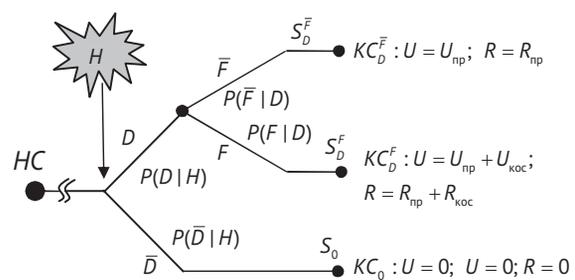


Рис. 9. «Дерево» сценариев для проведения количественной оценки живучести системы
 H — экстремальный режим нагружения, D — нанесение системе локального повреждения, \bar{D} — отсутствие локального повреждения, F — разрушение системы, \bar{F} — отсутствие разрушения

Тогда индекс живучести может быть сформирован в виде [9, 10]:

$$L_R = \frac{\sum_{i=1}^m R_{np_i}}{\sum_{i=1}^m R_{np_i} + \sum_{j=1}^n R_{koc_j}} \quad (22)$$

где: m — количество сценариев, в которых имеют место прямой ущерб и риски, обусловленные локальными повреждениями системы (общее количество сценариев); n — количество сценариев, в которых имеют место косвенный ущерб и риски, связанные с отказом системы в целом.

Эта величина также варьирует в интервале от 0 до 1. Система живучая, когда косвенные риски не вносят существенный вклад в общесистемный риск $R_s = R_{np} + R_{koc}$. Иными словами, для живучих систем ($L_R \rightarrow 1$) прямые риски значительно превышают косвенные ($R_{np} \gg R_{koc}$). Напротив, у системы с низкой живучестью ($L_R \rightarrow 0$) прямой ущерб и риски малы по сравнению с косвенными ($R_{np} \ll R_{koc}$).

Представленный риск-индекс живучести характеризует способность системы снижать риск непропорционального/катастрофического разрушения в случае ее локального повреждения.

4. Заключение

1. Под прочностной живучестью понимается способность системы продолжать воспринимать нагрузки и сопротивляться деформированию и разрушению после возникновения повреждений на различных масштабных уровнях. Источниками прочностной живучести могут быть: 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.

2. Обеспечение прочностной живучести является одним из ключевых элементов комплексной задачи по обеспечению защищенности объектов техносферы, решение которой в исторической ретроспективе осуществляется поэтапно и представляет собой последовательную постановку и поиск решения задач прочности, ресурса, надежности, живучести, безопасности, риска и защищенности.

3. Накопление повреждений и разрушение СТС представляет собой иерархически организованный процесс, который развивается по всей иерархии масштабов, начиная от наномасштабов и вплоть до ма-

кроскопического масштаба, определяемого структурой системы в целом. На основании моделей и подходов, разработанных в рамках физической мезомеханики, механики накопления повреждений, механики разрушения, механики катастроф, теории надежности, теории риска и теории систем, было показано, что для обеспечения адекватных результатов при моделировании процессов накопления повреждений и разрушения, а в ряде случаев и для получения достаточно точных количественных оценок, явный одновременный учет всего множества масштабов избыточен. Чтобы описать указанные процессы, вполне достаточно трех масштабных-структурных уровней: мезоуровня, который интегрально учитывает более мелкие масштабы и характеризует стабильность физико-механических свойств конструкционного материала при накоплении им рассеянных повреждений; 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). В соответствии с выделенными уровнями могут быть сформированы и три уровня оценки живучести: живучесть (стойкость) конструкционного материала, живучесть конструктивных элементов системы и структурная живучесть системы в целом.

4. Под живучестью (стойкостью) конструкционного материала понимается его способность полностью или частично сохранять свои физико-механические свойства и сопротивляться деформированию и разрушению при наличии деградиационных повреждений различной природы (усталостных, радиационных, коррозионных и др.). Для оценки стойкости материала был предложен комплекс дифференцированных и интегральных индексов, характеризующих ухудшение механических свойств материала при накоплении рассеянных повреждений.

5. В случае накопления микроповреждений и возникновения в конструктивном элементе макроповреждений его способность воспринимать нагрузки и сопротивляться деформированию и разрушению неизбежно снижается. Под прочностной живучестью конструктивного элемента понимается его способность сохранять, по крайней мере, частично свою несущую способность в течение некоторого времени (циклов нагружения) после возникновения микро- и макроповреждений различного типа. В дополнение к комплексу показателей, характеризующих стойкость конструкционного материала к накоплению рассеянных повреждений, был предложен ряд дополнительных индексов, позволяющих производить оценку живучести конструктивного элемента при

иницировании в нем макроповреждений различного типа (макротрещин, зон локальной потери устойчивости, областей местных пластических деформаций, очагов коррозионного поражения и т. д.).

6. Для оценки живучести СТС в целом была сформирована система показателей, основанных на детерминистских и вероятностных оценках прочности, а также интегральных подходах, базирующихся на проведении риск-анализа системы и на оценке ее прочностных характеристик в поврежденном состоянии. Наиболее полной характеристикой структурной живучести системы является ее сценарный граф. Анализ живучести на системном уровне предполагает исследование последовательности событий

и причинно-следственных связей между событиями, происходящими вслед за локальными повреждениями, вплоть до разрушения системы в целом. Иными словами, анализ живучести системы заключается в проведении качественного и количественного исследования структуры сценариев эскалации аварии. Использование индекса живучести, базирующегося на проведении риск-анализа рассматриваемой сложной технической системы, позволяет в наиболее полной мере учесть многовариантность сценариев разрушения.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Ахметханов Р.С., Резников Д.О., Дубинин Е.Ф. Анализ рисков и обеспечение защищенности критически важных объектов нефтегазохимического комплекса. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Тюмень, 2013.
2. 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.
3. Махутов Н.А., Петров В.П., Резников Д.О., Куксова В.И. Идентификация определяющих параметров угроз, уязвимости и защищенности критически важных объектов по отношению к преобладающим угрозам природного техногенного и террористического характера//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2008. № 2. С. 34–41.
4. Резников Д.О. Способы компенсации неопределенностей при обеспечении защищенности сложных технических систем и оптимизации затрат их жизненного цикла//Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 3. С. 57–64.
5. Махутов Н.А., Резников Д.О. Учет угроз, связанных с человеческим фактором, при оценке защищенности опасных производственных объектов//Безопасность труда в промышленности. 2015. № 1. С. 60–67.
6. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск, 2008.
7. Матвиенко Ю.Г. Моделирование и критерии разрушения в современных проблемах прочности, живучести и безопасности машин// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 3. С. 80–89.
8. Матвиенко Ю.Г. Развитие моделей и критериев разрушения в современных проблемах прочности и живучести//Вестник научно-технического развития. 2014. № 7 (83). С. 9–19.
9. Махутов Н.А., Петров В.П., Резников Д.О. Оценка живучести сложных технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 3. С. 47–66.
10. Буров А.Е. Оценка живучести конструкции крепления крышки гидротурбины в аварийной ситуации//Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. № 4. 2012. С 10–14.
11. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Доронин С.В. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем // Вычислительные технологии. 2009. Том 14, № 6. С. 58–70.
12. Доронин С.В. Расчеты живучести при проектировании машиностроительных конструкций//Тяжелое машиностроение. 2008. № 7. С. 9–12.
13. Cavaco E., Casas J.R., Neves L., Huespe, A. Robustness of corroded reinforced concrete structures — a structural performance approach. Structure and Infrastructure Engineering. 2013.9(1): pp.42–58.
14. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16, № 1. С. 5–26.
15. Абросимов Н.В., Агеев А.И., Адушкин В.В. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности. Москва, 2015.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

19. Lind N.C. Vulnerability of damage-accumulating systems. Reliability Engineering & System Safety, 1996. 53(2), 217–219.
 20. Baker J., Schubert M., Faber M. On the assessment of robustness // J. Structural Safety. 2007. Vol. 30. P. 253–267.
 21. Starossek U., Haberland M. Approaches to measures of structural robustness // Structure and Infrastructure Engineering. 2011. Vol. 7. P. 625–631.
 22. Махутов Н.А., Резников Д.О. Соотношение между запасом прочности и вероятностью разрушения при однократных и серийных нагрузках//Проблемы анализа риска. 2014. Т. 11. № 1. С. 6–18.
 23. Махутов Н.А., Резников Д.О. Анализ и обеспечение защищенности объектов критических с учетом рисков и предельных состояний//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. № 5. С. 14–36.
- ## REFERENCES
1. Makhutov N.A., Permyakov V.N., Akhmetkhanov R.S., Reznikov D.O., Dubinin E.F. *Analiz riskov i obespechenie zashchishchennosti kriticheski vazhnykh ob"ektov neftegazokhimicheskogo kompleksa* [Risk analysis and ensuring security of critical facilities petrochemical complex. Textbook for students of higher educational institutions]. Tyumen', 2013 (in Russian).
 2. Makhutov N. A., Reznikov D. O. Ispol'zovanie stsennogo analiza dlya otsenki prochnostnoy nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Use scenario analysis to evaluate the strength reliability of complex technical systems]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Problems of mechanical engineering and automation]. 2015, I. 1, pp. 4–13 (in Russian)
 3. Makhutov N.A., Petrov V.P., Reznikov D.O., Kuksova V.I. Identifikatsiya opredelyayushchikh parametrov ugroz, uyazvimosti i zashchishchennosti kriticheski vazhnykh ob"ektov po otnosheniyu k prevaliruyushchim ugrozam prirodnogo tekhnogenogo i terroristicheskogo kharaktera [Identification of the defining parameters of threats, vulnerabilities and security of critical facilities with respect to prevailing threats of natural and man-made terrorist nature]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Problems of safety and emergencies]. 2008, I. 2, pp. 34–41 (in Russian).
 4. Reznikov D.O. Sposoby kompensatsii neopredelennostey pri obespechenii zashchishchennosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem i optimizatsii zatrat ikh zhiznennogo tsikla [Methods for compensation of uncertainties while ensuring the security of complex technical systems and optimize the cost of their life cycle]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Problems of mechanical engineering and automation]. 2013, I. 3, pp. 57–64 (in Russian).
 5. Makhutov N.A., Reznikov D.O. Uchet ugroz, svyazannykh s chelovecheskim faktorom, pri otsenke zashchishchennosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov [Accounting risks associated with the human factor in assessing the security of dangerous industrial objects]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in the industry]. 2015, I. 1, pp. 60–67 (in Russian).
 6. Makhutov N.A. *Prochnost' i bezopasnost'. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya* [Durability and safety. Basic and applied research]. Novosibirsk, 2008 (in Russian).
 7. Matvienko Yu.G. Modelirovanie i kriterii razrusheniya v sovremennykh problemakh prochnosti, zhivuchesti i bezopasnosti mashin [Modeling and criteria for the destruction of modern problems of strength, vitality and safety of cars]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and reliability]. 2014, I. 3, pp. 80–89 (in Russian).
 8. Matvienko Yu.G. Razvitie modeley i kriteriev razrusheniya v sovremennykh problemakh prochnosti i zhivuchesti [The development of models and fracture criteria in the current problems of strength and vitality]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of scientific and technological development]. 2014, I. 7 (83), pp. 9–19 (in Russian).
 9. Makhutov N.A., Petrov V.P., Reznikov D.O. Otsenka zhivuchesti slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Evaluation of survivability of complex technical systems]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Problems of safety and emergencies]. 2009, I. 3, pp. 47–66. (in Russian).
 10. Burov A.E. Otsenka zhivuchesti konstruksii krepleniya kryshki gidroturbiny v avariynoy situatsii [Evaluate the survivability of attachment hydraulic turbine cover emergency]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University]. 2012, I. 4, pp. 10–14. (in Russian).
 11. Lepikhin A.M., Moskvichev V.V., Doronin S.V. *Nadezhnost', zhivuchest' i bezopasnost' slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Vychislitel'nye tekhnologii* [Reliability, survivability and safety of complex technical systems. Computational technologies]. 2009, V. 14, I. 6, pp. 58–70 (in Russian)
 12. Doronin S.V. Raschety zhivuchesti pri proektirovanii mashinostroitel'nykh konstruksiy [Calculations survivability when designing engineering structures]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering]. 2008, I. 7, pp. 9–12 (in Russian).
 13. Cavaco E., Casas J.R., Neves L., Huespe, A. Robustness of corroded reinforced concrete structures — a structural

- performance approach. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2013.9(1): pp.42–58.
14. Makarov P.V., Eremin M.O. Model' razrusheniya khrupkikh i kvazikhрупkikh materialov i geosred [Model fracture of brittle and quasi-brittle materials and geomedial]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Fiz]. 2013, V. 16, I. 1, pp. 5–26 (in Russian).
 15. Abrosimov N.V., Ageev A.I., Adushkin V.V. *Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Nauchnye osnovy tekhnogennoy bezopasnosti* [Safety of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Scientific basis for technological safety]. Moscow, 2015 (in Russian).
 16. Makhutov N.A., Reznikov D.O., Zatsarinnyy V.V. Dva tipa stszenariy avariyy v slozhnykh tekhnicheskikh sistemakh [Two types of accident scenarios in complex technical systems]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Problems of safety and emergencies]. 2014, I. 2, pp. 28–41 (in Russian).
 17. Bol'shakov A.M., Zakharova M.I. Opredelenie vozmozhnykh stszenariy vozniknoveniya, razvitiya i veroyatnosti realizatsii avariynykh situatsiy na rezervuarakh dlya khraneniya nefi i nefteproduktov pri nizkikh temperaturakh ekspluatatsii [Identification of possible scenarios of occurrence, development and the probability of accidents in the tanks for oil storage at low temperatures of operation]. *Problemy analiza riska* [The problems of risk analysis]. 2012, V. 9, I. 3, pp. 22–33 (in Russian).
 18. Makhutov N.A., Petrov V.P., Akhmetkhanov R.S., Dubinin E.F., Dvoretzkaya T.N. *Osobennosti stszenarnogo analiza vozniknoveniya i razvitiya tekhnogennykh katastrof. Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Features of scenario analysis of the origin and development of man-made disasters. Security issues and emergencies]. 2007, I. 3, pp. 3–28 (in Russian).
 19. Lind N.C. "Vulnerability of damage-accumulating systems." *Reliability Engineering & System Safety*, 1996. 53(2), 217–219.
 20. Baker J., Schubert M., Faber M. On the assessment of robustness // *J. Structural Safety* 2007. Vol. 30. P. 253–267.
 21. Starossek U., Haberland M. Approaches to measures of structural robustness // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2011. Vol. 7. P. 625–631.
 22. Makhutov N.A., Reznikov D.O. Sootnoshenie mezhdunarodnykh zapasom prochnosti i veroyatnost'yu razrusheniya pri odnokratnykh i seriynykh nagruzkakh [The relationship between the margin and the probability of failure at single and serial loads]. *Problemy analiza riska* [risk analysis issues]. 2014, V. 11, I. 1, pp. 6–18 (in Russian).
 23. Makhutov N.A., Reznikov D.O. Analiz i obespechenie zashchishchennosti ob"ektov kriticheskikh s uchetom riskov i predel'nykh sostoyaniy [Analysis and provision of security of critical facilities, taking into account the risks and limit states]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Problems of safety and emergencies]. 2012, I. 5, pp. 14–36 (in Russian).

Multilevel Survivability Assessment of Complex Technical Systems with Account for Large-Scale and Structural Hierarchy of Damages and Destruction Accumulation Processes

N.A. Makhutov, Doctor of Engineering, Chief Researcher, Member Correspondent of Russian Academy of Sciences, Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of Russian Academy of Sciences

D.O. Reznikov, Ph.D. of Engineering, Leading Researcher, Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of Russian Academy of Sciences

Ensuring survivability, defined as the ability of the technical system in a damaged state, to carry out (in full or in part) their duties and avoid catastrophic damage, is an important element of the complex security problems technosphere objects. In this paper are considered the basic approaches to quantitative assessment of complex technical systems' survivability taking into account that damage accumulation and fracture processes are developed along a broad range of the system's scales: starting from the nano-scale level and up to the global structural level of the system. Three basic scales were single out from the entire spectrum of the system's scales. These scales allow describe the system failure process. A set of indexes describing systems' survivability at the specified above scale levels has been presented. The next basic approaches to quantitative assessment of complex systems' survivability have been developed: approaches based on deterministic and probabilistic assessments of system's residual strength after macro-defects initiation, as well as integral approaches based on risk assessment and on estimation of reducing of system's key strength characteristics when its damage level has increased.

Keywords: technical systems' safety, strength, structural integrity, survivability, durability, different-scale models, damage, fracture.