Динамика, прочность приборов и аппаратуры

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-4-4>
УДК 62-19:621.45.017

С.В. Доронин, Ю.Ф. Филиппова

ДОРОНИН СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., ведущий научный сотрудник, AuthorID: 116272, SPIN: 9816-9080, ORCID: 0000-0002-5256-3871, ResearcherID: V-5470-2017, ScopusID: 57193348323, e-mail: sdoronin@ict.nsc.ru
ФИЛИППОВА ЮЛИЯ ФЕДОРОВНА – младший научный сотрудник, AuthorID: 636598, SPIN: 7778-5327, ORCID: 0000-0001-7452-2096, ResearcherID: A-9919-2014, ScopusID: 57193351701, e-mail: filippovajf@ict.nsc.ru
Лаборатория вычислительной механики и риск-анализа
Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал
Мира пр. 53, Красноярск, Россия, 660049

Оценка живучести структурно-сложных силовых конструкций на основе сценариев накопления повреждений

Аннотация: Классические расчеты на прочность, жесткость и устойчивость выполняются для неповрежденных конструкций. Изучение влияния повреждений и локальных разрушений на свойства и поведение технических объектов осуществляется с позиций конструкционной живучести. Для структурно-сложных силовых конструкций авторами предложена методика оценки живучести, включающая изучение конструкции и взаимодействий входящих в нее элементов, анализ возможных предельных состояний и условий нарушения работоспособности, определение множества сценариев накопления повреждений, разработку и исследование логико-вычислительной модели поведения повреждаемой конструкции. Получение предложенных ранговых оценок осуществляется на множестве всех потенциально возможных сценариев накопления повреждений конструкции и включает определение как индивидуальных рангов для каждого из возможных сценариев, так и потенциального, системно обусловленного ранга живучести, учитывающего все возможные исходы сценариев накопления повреждений. Исследована живучесть типового узла сочленения стержневых элементов силового каркаса крупногабаритного рефлектора зеркальной антенны наземных систем спутниковой связи: значение потенциального ранга живучести составляет 0,66, тогда как ранги живучести на рассмотренном множестве сценариев накопления повреждения составили 0,5–1,0 в зависимости от величин и соотношения усилия преднатяжения болтов и растягивающей силы в силовом стержневом элементе. Применение результатов целесообразно при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для повышения безотказности высокоответственных технических объектов.

Ключевые слова: структурно-сложные конструкции, живучесть, сценарий повреждения, вычислительная модель.

Введение

Изучение поведения технических объектов в частично поврежденных состояниях относится к предметной области конструкционной живучести. Достижения в этой сфере представлены весьма большим количеством публикаций, касающихся как разработки общих,

© Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф., 2019

О статье: поступила: 08.11.2019; финансирование: бюджет – Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал.

методологических, вопросов, так и анализа свойств поврежденных конструкций различной отраслевой принадлежности или различных типов. Наиболее интересные результаты получены применительно к конструкциям: строительным, энергетического оборудования, сосудов давления и трубопроводов, судов и самолетов, а также стержневым и тонкостенным.

Детерминированные и вероятностные оценки свойства живучести конструкций описываются показателями (индексами, функциями), выражающими снижение функциональных характеристик в связи с уровнем накопленных повреждений. К детерминированным относятся следующие определения:

- чувствительность системной характеристики по отношению к величине возмущающего события [11];
- индекс живучести как отношение уровня поврежденности к максимально возможному повреждению, при котором еще сохраняется конструкционная целостность [2];
- показатель живучести на основе соотношения между числом неповрежденных и общим количеством конструктивных элементов [1];
- детерминированные показатели на основе соотношения максимального и приемлемого прироста повреждения [16], характеристик прочности и текучести конструкционного материала [12];
- показатели, описывающие величины запасов по разрушающим нагрузкам [13] и несущей способности [14];
- индексы живучести, характеризующие жесткость конструкций в поврежденном и неповрежденном состоянии [11].

К типичным вероятностным оценкам относятся:

- индекс живучести, определяемый как соотношение надежности неповрежденной и поврежденной конструкции в связи со статистическим рассеянием несущей способности и нагрузки [9];
- индекс системной избыточности, показывающий соотношение вероятностей повреждения и отказа системы [15];
- функция живучести как мера устойчивости к стохастически распределенной системе дефектов [3].

Особенность рассмотренных характеристик: объектом анализа являются конструкции в поврежденном состоянии, без учета причин и условий возникновения последнего, что ограничивает возможности интерпретации количественных оценок живучести с позиций их использования для обеспечения устойчивой безотказной работы технических объектов. Этого недостатка частично лишены исследования живучести, учитывающие несколько альтернативных сценариев накопления повреждений и развития аварийных разрушений [5–8]. Однако такие исследования выполнены в весьма общей постановке, причины, условия, последствия множества возможных сценариев накопления повреждений применительно к конкретным техническим объектам, как правило, системно не изучаются.

Цель настоящей статьи – обоснование и практическая апробация методики оценки живучести повреждаемых конструкций на основе альтернативных сценариев накопления повреждений и разрушения, устанавливаемых из взаимодействия структурных элементов механической системы.

Методика оценки живучести силовых конструкций

Необходимость рассмотрения множества альтернативных вариантов сценариев накопления повреждения и разрушения объясняется структурной сложностью конструкций, с разнородными структурными элементами и их физико-техническими взаимодействиями в составе механической системы.

В силу сложности конструкций и многообразия механических взаимодействий между структурными элементами, очевидно, возможны различные варианты предельных состояний и нарушения работоспособности. Детальный анализ живучести предполагает учет всех вари-

антов поведения повреждаемой конструкции, в связи с чем обязательным компонентом методики анализа живучести будем считать обоснование сценариев накопления повреждений и разрушения конструкции, учитывающих все взаимодействия структурных элементов.

В связи с этим предлагается методика, основанная на вычислительных технологиях и численном моделировании механики деформирования и разрушения, которая на первом этапе предполагает:

- изучение состава и построение содержательной модели структуры конструкции;
- установление связей структурных элементов, построение модели возможных их механических взаимодействий;
- определение возможных повреждений взаимодействующих структурных элементов и формулировку соответствующих условий прочности;
- логический анализ возможных последовательностей возникновения и развития повреждений, построение сценарной диаграммы развития повреждений, учитывающей взаимосвязь и взаимообусловленность процессов накопления повреждений;
- выбор критериев прочности, дополняющих сценарную диаграмму развития повреждений для последующего количественного анализа;
- разработку логико-вычислительной модели анализа живучести конструкции и исследование возможности осуществления каждого из альтернативных сценариев накопления повреждений.

Реализация этих позиций методики представляет инструмент прогнозирования (оценки) состояния поврежденности конструкции при заданном комплексе внешних воздействий.

Примем общепринятую общую трактовку понятия живучести как способности поврежденной конструкции сохранять частичную работоспособность. В связи с принятой трактовкой в качестве критерия живучести для силовых конструкций следует рассматривать сохранение конструкционной целостности при реализации каждого сценария накопления повреждений и разрушения. То есть если при реализации некоторого из возможных сценариев накопления повреждений конструкция сохраняет целостность и способность передавать силовой поток между структурными элементами, живучесть следует считать обеспеченной по этому сценарию. В свою очередь, если живучесть обеспечена по всем возможным сценариям накопления повреждений, живучесть конструкции следует считать обеспеченной безусловно.

Рассмотрим далее возможности количественного оценивания живучести. С учетом фактора времени и кинетики развития повреждений она должна характеризовать промежуток времени от момента возникновения первоначального повреждения до полной потери работоспособности, под которой для силовых конструкций следует понимать потерю конструкционной целостности. Этот промежуток может измеряться непосредственно в единицах времени (при явном его учете) или опосредованно – в терминах событий или процессов накопления повреждений. С учетом многообразия последних количественную оценку живучести предлагается осуществлять следующим образом.

Рассматриваются три потенциально возможные варианта исхода реализации сценария накопления повреждений.

Вариант 1 – один или несколько последовательных актов (событий) повреждения (локального разрушения) не приводят к потере конструкционной целостности. Конструкция полностью сохраняет свою работоспособность. Этот вариант реализуется при наличии структурной избыточности и резервировании.

Вариант 2 – несколько (не менее двух) последовательных актов повреждения приводят к потере конструкционной целостности. Этот вариант означает разрушение, отложенное по времени.

Вариант 3 – единственный акт локального повреждения приводит к потере конструкционной целостности. Это равносильно немедленному разрушению.

Тогда введем ранг живучести, который будем считать равным 1 при реализации сценария накопления повреждений с первым вариантом реализации исхода (конструкционная

целостность обеспечена при наличии последовательности повреждений). При реализации сценария с третьим вариантом исхода ранг живучести будем считать равным 0 (конструкционная целостность не обеспечена при единственном повреждении). Соответственно, при реализации сценария накопления повреждений со вторым вариантом исхода, ранг живучести будем считать равным 0,5 (конструкционная целостность обеспечена как минимум при одном повреждении).

Возможность реализации того или иного сценария накопления повреждений определяется как системными свойствами конструкции, так и уровнем ее нагруженности в составе конкретного технического объекта. Очевидно, конструктивно идентичные объекты, нагруженные по-разному даже в составе одной и той же технической системы, потенциально имеют один и тот же уровень живучести, но фактически реализуется уровень, соответствующий реально осуществившемуся сценарию.

Тогда потенциальный, системно обусловленный ранг живучести определим следующим образом. В результате исследования всех возможных сценариев накопления повреждений устанавливается количество n_1 сценариев с первым вариантом исхода, n_2 – со вторым вариантом и n_3 – с третьим вариантом исхода. Потенциальный ранг определяется в диапазоне от 0 (конструкционная целостность не обеспечена при любом повреждении) до 1 (конструкционная целостность обеспечена при любых повреждениях) как

$$Z = \frac{n_1 \cdot 1 + n_2 \cdot 0,5 + n_3 \cdot 0}{n_1 + n_2 + n_3}.$$

Для оценки живучести при определенном уровне нагружения необходимо исследование логико-вычислительной модели при заданном комплексе воздействий для установления фактически реализующихся сценариев накопления повреждений.

Рассмотрим далее применение разработанной методики к конкретному структурно-сложному объекту – узлу сочленения структурных элементов пространственной стержневой силовой конструкции. Выбор объекта обусловлен как чрезвычайно широким распространением стержневых конструкций в современных технических объектах, так и недостаточным, на наш взгляд, вниманием, уделяемым исследованию процессов повреждения и разрушения узлов сочленения.

Модели структуры и возможных взаимодействий узла сочленения для обоснования сценариев накопления повреждений

В качестве технического объекта рассмотрим силовой каркас крупногабаритного рефлектора зеркальной антенны наземных систем спутниковой связи (рис. 1).

Рис. 1. Силовой каркас: а – общий вид, б – фрагмент.

В зависимости от количества стержней, входящих в узел сочленения, конструктивные решения последнего несколько отличаются. Однако, не нарушая общности разработанной методики, рассмотрим ее применение на примере типовой конструкции узла сочленения че-

тырех стержневых элементов (рис. 2). Она включает трубу и фитинг из полимерных композиционных материалов различной структуры, набор крепежа, включающий стальные обойму, болты и гайки (рис. 2, а). Несмотря на небольшое число конструктивных элементов (деталей), объединение их в систему осуществляется с помощью разнородных физико-технических связей: резьбовых и клеевых соединений, фрикционных взаимодействий. Это формирует высокую степень структурной неоднородности конструкции.

Анализ конструктивного решения и внешних силовых воздействий (рис. 2, б) позволили построить модель структуры узла (рис. 2, в).

Рис. 2. Конструкция (а), расчетная схема (б) и модель структуры (в) узла сочленения трубы с фитингом:

1 – труба; 2 – фитинг; 3 – обойма; 4 – болт; 5 – гайка; C1, C2 – резьбовые соединения; C3 – клеевое соединение; C4–C15 – фрикционные взаимодействия; Δ – зазор; F_0 – усилие предварительной затяжки болтов; F_{st} – растягивающая сила.

Предполагается предварительная затяжка болтовых соединений, в связи с чем при нагружении растягивающей силой F_{st} прижатых друг к другу деталей между ними возникают силы трения – фрикционные взаимодействия, оказывающие существенное воздействие на поведение узла. К ним относятся взаимодействия между гайкой и обоймой (C4, C5), обоймой и трубой (C6), головкой болта и фитингом (C7, C8), стержнем болта и фитингом (C11, C14), стержнем болта и трубой (C10, C13), стержнем болта и обоймой (C9, C12), стержнем болта и гайкой (C1, C2). На рис. 2 выделенное желтым цветом клеевое соединение C3 предполагается разрушаемым при определенных условиях, в связи с чем после разрушения соединения C3 вместо него возникает фрикционное взаимодействие C15, что отражается соответствующей стрелкой на рис. 2, в.

Полученной модели структуры соответствует граф модели возможных взаимодействий структурных элементов (рис. 3).

Рис. 3. Модель взаимодействия структурных элементов узла соединения трубы с фитингом.

Анализ моделей структуры узла и возможных взаимодействий структурных элементов делает очевидной возможность среза болтов при достаточно больших значениях силы F_{st} . Но неочевиден возможный характер повреждения композитных деталей. Для уточнения возможного характера повреждения композитных деталей узла проведены его экспериментальные исследования на растяжение.

Испытанию подвергались два типа образцов: 1 – композитные детали соединены болтами (рис. 4, а); 2 – композитные детали склеены, две заклепки не являются силовыми и предназначены для удобства монтажа (рис. 4, б).

Рис. 4. Испытательные образцы болтового (а) и клеевого (б) соединений.

В результате эксперимента установлена возможность следующих повреждений:

- смятие композитных деталей преднатяженными болтами (рис. 5, а);
- повреждения клеевого слоя и смещения деталей друг относительно друга (рис. 5, б);
- смятия и повреждения деталей болтами в направлении растягивающей силы (рис. 5, в).

Рис. 5. Характерные повреждения композитных деталей.

Принципиально важно рассматривать повреждения и локальные разрушения как взаимосвязанные события и процессы. Построение модели накопления повреждений, учитывающей структурные взаимодействия элементов конструкции, взаимосвязь и взаимообусловленность процессов накопления повреждений, обосновываются следующим образом.

Многоуровневый процесс накопления повреждений описывается ориентированным графом, где вершины представляют собой понятия предметной области (в данном случае повреждения как состояния, ассоциированные с той или иной неоднородностью), а дуги – отношения между вершинами. В данном случае мы имеем дело с отношениями причинности. Таким образом, построенный граф представляет собой обобщенный сценарий развития повреждений, связанных с теми или иными неоднородностями, вплоть до потери конструктивной целостности. Многоуровневость процесса повреждений характеризуется количеством дуг, связывающих одновременно протекающие процессы развития повреждений. Сами же отношения причинности необязательно имеют смысл детерминированной обусловленности, а могут отражать различную степень причинной обусловленности. Рассматриваемая модель соответствует пониманию многоуровневого процесса накопления повреждений как системы, в которой существует взаимовлияние и взаимообусловленность развития отдельных повреждений.

Построенная модель представлена сценарной диаграммой развития повреждений (рис. 6). С вершинами графа, описывающими повреждения, ассоциируются конструктивные элементы (Ф, Т, О, Б1, Б2), в которых эти повреждения локализованы.

Рис. 6. Сценарная диаграмма развития повреждений узла сочленения (обозначения в соответствии с рис. 2 и рис. 3).

Формулировки условий прочности, соответствующих рассматриваемым повреждениям и определяющих конструкционную целостность узла, имеют следующий вид (табл. 1).

Модель накопления повреждений является качественной. Она характеризует «глубину» процесса накопления повреждений — количество разнородных повреждений, воспринимаемых конструкцией до потери ее конструкционной целостности. На схеме (рис. 6) это выражается количеством дуг (стрелок), соединяющих вершины графа.

Таблица 1

Условия прочности

Предельное состояние	Формулировки условий прочности
Смятие деталей преднатяженными болтами	$\sigma < \sigma_{cr}^f, \sigma < \sigma_{cr}^s, \sigma < \sigma_{cr}^p$, где $\sigma = F_0^{real}/A^k$ — максимальные эквивалентные напряжения в зоне контакта; F_0^{real} — реальное (фактическое) усилие затяжки болта; A^k — площадь контактного взаимодействия деталей; $\sigma_{cr}^f, \sigma_{cr}^s, \sigma_{cr}^p$ — соответственно прочность на смятие фитинга, обоймы, трубы.
Ослабление затяжки болтов	$F_0^{real} < F_0^{calc}$, где F_0^{calc} — расчетное (проектное) усилие затяжки болта.
Разрушение клеевого слоя	$\sigma_{glue} < \sigma_{glue_{cr}}$, где σ_{glue} — эквивалентные напряжения в клеевом слое; $\sigma_{glue_{cr}}$ — прочность клеевого слоя.
Нарушение плотности соединения	$\tau < \mu_s \cdot P$, где μ_s — коэффициент трения покоя; τ — предельное касательное напряжение трения; P — нормальное контактное давление.
Разрушение обоймы	$\sigma^s < \sigma_b^s$, где σ^s — максимальные эквивалентные напряжения в обойме; σ_b^s — временное сопротивление разрушению материала обоймы.
Разрушение фитинга	$\sigma^f < \sigma_b^f$, где σ^f — максимальные эквивалентные напряжения в фитинге; σ_b^f — временное сопротивление разрушению материала фитинга.
Разрушение трубы	$\sigma^p < \sigma_b^p$, где σ^p — максимальные эквивалентные напряжения в трубе; σ_b^p — временное сопротивление разрушению материала трубы.
Срез болтов	$\tau^b < \tau_{cut}^b$, где τ^b — максимальное касательное напряжение в сечении болта; τ_{cut}^b — предел прочности материала болта на срез.

Аналогичным образом могут быть построены модели структуры и возможных взаимодействий структурных элементов для обоснования сценариев повреждения узлов сочленения любой конфигурации.

Разработка логико-вычислительной модели анализа живучести и определение множества сценариев накопления повреждений

На основании моделей структуры и возможных взаимодействий элементов узла сочленения, в том числе условий прочности, соответствующих их повреждениям, разработана и практически реализована логико-вычислительная модель анализа живучести узла сочленения, позволяющая получить количественные оценки возможностей перехода от одного состояния поврежденности к другому при осуществлении той или иной ветви сценария. Модель разработана на основе известного метода конечных элементов, сконструирована с использованием «стандартных» процедур и алгоритмов решения задач механики деформирования и включает в себя вычислительные модули, реализованные в современных пакетах численного анализа: БВМСУА – базовая вычислительная модель статического упругого анализа, ВМПУ – вычислительная модель потери устойчивости, ВМКВ – вычислительная модель контактного взаимодействия. Включение в состав модели указанных вычислительных моделей в виде самостоятельных блоков позволяет сосредоточиться на логике поведения повреждаемой конструкции. Модель позволяет анализировать поведение конструкции как в неповрежденном состоянии, так и в различных поврежденных состояниях.

С использованием рассматриваемых моделей структуры, возможных взаимодействий, накопления повреждений и включаемых «стандартных» вычислительных модулей разработанная структура логико-вычислительной модели анализа живучести представлена на рис. 7.

Рис. 7. Структура логико-вычислительной модели анализа живучести (накопления повреждений) фитинга и трубы узла сочленения стержневого каркаса.

Вычислительная модель содержит пять условий, выполнение или невыполнение которых активизирует ту или иную ветвь/подветвь сценария:

$$\sigma < \sigma_{cr}^f, \sigma_{cr}^s, \sigma_{cr}^p, \quad (1)$$

$$\sigma_{glue} < \sigma_{glue_{cr}}, \quad (2)$$

$$\sigma^f, \sigma^s, \sigma^p, < \sigma_b, \quad (3)$$

$$\tau < \mu_s \cdot P, \quad (4)$$

$$\tau^b < \tau_{cut}^b. \quad (5)$$

Количество возможных сценариев не может быть определено по правилам комбинаторики как число исходов для пяти условий (1)–(5), проверка каждого из которых приводит к одному из возможных вариантов результата («да» – выполняется, «нет» – не выполняется). В реальности количество возможных сценариев оказывается существенно меньше, чем оценка по правилам комбинаторики, так как невозможны (лишены физического и технического смысла) многие комбинации условий. Именно структура логико-вычислительной модели (рис. 7), определяемая структурой узла (рис. 2), моделью взаимодействия структурных элементов узла (рис. 3) и моделью накопления повреждений (рис. 6), определяет перечень имеющих смысл сценариев, учитываемых при анализе и оценке живучести.

Рассмотрение условий (1)–(5) с учетом возможности их совместного осуществления в различных структурных элементах и связях приводит к множеству сценариев в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Варианты сценариев поврежденных состояний узла сочленения

Сценарий, №	Выполнение условий							
	(1-1)	(1-1)*	(2)	(3)	(4)	(5-1)	(5-2)	(1-2)
1	Нет	Нет	–	–	–	–	–	–
2	Нет	Да	Да	Да	–	–	–	–
3	Да	–	Да	Нет	–	–	–	–
4	Да	–	Нет	Да	Да	–	–	–
5	Да	–	Нет	Нет	Да	–	–	–
6	Нет	Да	Да	Нет	–	–	–	–
7	Нет	Да	Нет	Да	Да	–	–	–
8	Нет	Да	Нет	Нет	Да	–	–	–
9	Нет	Да	Нет	–	Нет	Да	–	Да
10	Нет	Да	Нет	–	Нет	Нет	Да	Да
11	Нет	Да	Нет	–	Нет	Нет	Нет	–
12	Нет	Да	Нет	–	Нет	Нет	Да	Нет
13	Да	–	Нет	–	Нет	Да	–	Да
14	Да	–	Нет	–	Нет	Нет	Да	Да
15	Да	–	Нет	–	Нет	Нет	Нет	–
16	Да	–	Нет	–	Нет	Нет	Да	Нет
17	Нет	Да	Нет	–	Нет	Да	–	Нет
18	Да	–	Нет	–	Нет	Да	–	Нет

Примечание. Условие смятие деталей (1-1) головкой болта/гайкой и (1-2) стержнем болта; условие (5-1) срез 1-го болта и (5-2) срез 2-го болта.

Таким образом, принципиально возможными оказываются восемнадцать сценариев накопления повреждений, условия практического осуществления каждого из которых выясняется при исследовании построенной модели.

Исследование логико-вычислительной модели анализа живучести узла сочленения

Сценарии, описываемые в табл. 2, могут быть графически визуализированы на структурной схеме логико-вычислительной модели. Визуализация осуществляется с помощью жирной линии, соединяющей логические блоки модели, и показывает траекторию развития сценария по схеме логико-вычислительной модели. Это дает возможность определить количество актов (событий) повреждений при реализации каждого сценария вплоть до потери конструкционной целостности узла. Так, при отсутствии повреждений визуализация сценария работы неповрежденной конструкции отражена схемой на рис. 8. А при реализации сценария № 8 накопления повреждений визуализация (рис. 9) показывает потерю конструкционной целостности вследствие возникновения двух событий повреждаемости при нарушении соответствующих условий прочности.

Рис. 8. Визуализация сценария работы неповрежденной конструкции.

На основании рассматриваемого множества сценариев выполним оценку потенциального, системно обусловленного ранга живучести.

Имеется $n_1 = 7$ сценариев с первым вариантом исхода, $n_2 = 10$ сценариев со вторым вариантом и $n_3 = 1$ сценарий с третьим вариантом исхода.

Тогда потенциальный ранг живучести для данного узла сочленения равен

$$Z = \frac{n_1 \cdot 1 + n_2 \cdot 0,5 + n_3 \cdot 0}{n_1 + n_2 + n_3} = \frac{7 \cdot 1 + 10 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0}{7 + 10 + 1} = \frac{12}{18} = 0,66.$$

Такая оценка является безотносительной к уровню нагруженности и скорее характеризует уровень технического совершенства узла.

Рис. 9. Визуализация сценария № 8 накопления повреждений.

Рассмотрим далее результаты, полученные в связи с варьируемым уровнем нагруженности при разных значениях действующих силовых факторов (усилия преднатяжения болтов F_0 и растягивающая сила в трубе F_{st}). Верхняя граница интервала усилия преднатяжения болтов определялась их несущей способностью минимальным разрушающим усилием по ГОСТ Р 52627-2006 (ИСО 898-1:1999).

Эти результаты получены с использованием конечно-элементной модели, граничные условия которой включают в себя жесткие закрепления, симметрию и осевую растягивающую силу (рис. 10).

Рис. 10. Граничные условия.

Модель (рис. 11) разработана для узла сочленения со следующими физико-техническими параметрами. Свойства материалов: гайка, болт, обойма – углеродистая сталь с модулем Юнга $E = 210000$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$; фитинг – тканый полимер-

ный композит: $E_x = E_y = 61340$ МПа, $E_z = 6900$ МПа, $\nu_{xy} = 0,04$, $\nu_{yz} = \nu_{xz} = 0,3$, $G_{xy} = 19500$ МПа, $G_{yz} = G_{xz} = 2700$ МПа; труба – однонаправленный полимерный композит: $E_x = 60900$ МПа, $E_y = 27000$ МПа, $E_z = 15000$ МПа, $\nu_{xy} = 0,07$, $\nu_{yz} = 0,4$, $\nu_{xz} = 0,27$, $G_{xy} = G_{xz} = 4700$ МПа, $G_{yz} = 3100$ МПа; коэффициент трения $\mu = 0,15$.

**Рис. 11. Конечно-элементная модель:
1 – труба; 2 – фитинг.**

Результаты систематических расчетов выражены в виде расчетных зависимостей напряжений в деталях от величин F_0 и F_{st} . По полученным зависимостям возможно для конкретных сочетаний F_0 и F_{st} определить фактически реализующийся сценарий и получить соответствующие оценки живучести. Результат такого анализа выглядит следующим образом.

При $F_0 = 2000$ Н и $F_{st} < 5400$ Н повреждений не возникает и оценка живучести не выполняется. При $F_0 = 2000$ Н и $5400 \text{ Н} \leq F_{st} < 5670$ Н реализуется четвертый сценарий накопления повреждений, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии единичного повреждения. Этот сценарий соответствует первому варианту исхода, соответственно, ранг живучести составляет 1. При $F_0 = 2000$ Н и $F_{st} \geq 5670$ Н реализуется пятый сценарий, при котором конструкционная целостность нарушается при наличии двух повреждений, что соответствует второму варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 0,5.

При $F_0 = 6000$ Н и $F_{st} < 5400$ Н повреждений не возникает и оценка живучести не выполняется. При $F_0 = 6000$ Н и $5400 \text{ Н} \leq F_{st} < 5780$ Н реализуется четвертый сценарий накопления повреждений, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии единичного повреждения. Этот сценарий соответствует первому варианту исхода, соответственно, ранг живучести составляет 1. При $F_0 = 6000$ Н и $F_{st} \geq 5780$ Н реализуется пятый сценарий, при котором конструкционная целостность нарушается при наличии двух повреждений, что соответствует второму варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 0,5.

При $F_0 = 10000$ Н и $F_{st} < 5400$ Н повреждений не возникает и оценка живучести не выполняется. При $F_0 = 10000$ Н и $5400 \text{ Н} \leq F_{st} < 6000$ Н реализуется четвертый сценарий накопления повреждений, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии единичного повреждения. Этот сценарий соответствует первому варианту исхода, соответственно, ранг живучести составляет 1. При $F_0 = 10000$ Н и $6000 \text{ Н} \leq F_{st} < 7000$ Н реализуется тринадцатый сценарий, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии двух повреждений, что соответствует первому варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 1. При $F_0 = 10000$ Н и $F_{st} \geq 7000$ Н реализуется восемнадцатый сценарий, при котором конструкционная целостность нарушается при наличии трех повреждений, что соответствует второму варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 0,5.

Аналогично проанализированы условия реализации всех остальных сценариев и соответствующие ранги живучести.

По результатам выполненного анализа построена диаграмма областей расчетных рангов живучести (рис. 12), определяющая совокупности пар значений F_0 и F_{st} , приводящих

к сценарию с тем или иным рангом живучести. Это позволяет обосновать выбор таких сочетаний F_0 и F_{st} , при которых конструкционная целостность узла будет обеспечена при любых сценариях накопления повреждений.

Рис. 12. Области расчетных рангов живучести.

Таким образом, для рассматриваемого структурно-сложного узла сочленения стержневых элементов установлены значения внутренних и внешних воздействий (усилия преднатяжения болтов и растягивающих сил в стержнях), соответствующие реализации разных вариантов развития повреждений.

Обсуждение результатов

Обоснование теоретической части методики и практическая ее апробация на примере конкретной структурно-сложной конструкции узла сочленения позволяют утверждать, что созданы предпосылки и работающий инструментарий для изучения свойств конструкции в поврежденном состоянии на ранних стадиях ее жизненного цикла. Количественные результаты выражаются в ранговых оценках живучести и при систематическом исследовании выполнения условий прочности и возникновения предельных состояний конструкций позволяют установить все возможные сценарии накопления повреждений.

Предложенная методика является самодостаточной и позволяет осуществить полный цикл анализа живучести – от предварительного изучения конструктивного решения до получения количественных оценок живучести на множестве всех возможных сценариев накопления повреждений, обусловленных интервалом изменения комплекса нагрузок и воздействий.

Итак, в рамках одной авторской методики, созданной для анализа конструкционной живучести, впервые интегрированы все необходимые модели и вычислительные технологии, позволяющие получить достаточно полное представление о возможных состояниях поврежденности структурно-сложной конструкции и количественные оценки уровня их работоспособности в этих состояниях.

Неизбежным недостатком рассматриваемого подхода является необходимость проведения большого количества вычислительных экспериментов, которое резко возрастает при увеличении структурной сложности конструкции (росте количества структурных элементов, многообразия механических взаимодействий и, соответственно, числа сценариев накопления повреждений). Однако при разработке уникальных высокоответственных технических объектов такие затраты оправданы и даже необходимы. В настоящее время представляется необходимым осуществление декомпозиции структурно-сложных конструкций с целью вычленения ограниченного числа подсистем, подвергаемых анализу живучести в соответствии с предложенной методикой.

Заключение

Для количественного оценивания живучести повреждаемых структурно-сложных конструкций теоретически обоснована и практически апробирована авторская методика, включающая:

- построение модели структуры конструкций и взаимодействий ее элементов;
- обоснование сценарной диаграммы и определение множества сценариев (последовательностей) накопления повреждений;
- разработку логико-вычислительной модели поведения повреждаемой конструкции и использование ее для исследования условий реализации каждого из возможных сценариев;
- определение ранговых оценок живучести.

Практический результат такого подхода: установление взаимосвязи между прогнозируемым уровнем живучести и величинами внешних нагрузок и воздействий. Это, в свою очередь, позволяет определить рациональную область применения рассматриваемого конструктивного варианта и обосновать технические решения по его совершенствованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П. Резервы живучести безригельного каркаса при запроектных воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 3. С. 31–35.
2. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Методика расчета строительных конструкций на единичную живучесть // Сб. науч. тр. междунар. симпозиума «Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство)». Брест: БрГТУ, 2009. С. 132–141.
3. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Доронин С.В. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем // Вычислительные технологии. 2009. № 6. С. 58–70.
4. Махутов Н.А., Петров В.П., Резников Д.О. Оценка живучести сложных технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 3. С. 47–66.
5. 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. 28–40.
6. 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.
7. 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. № 4. С. 3–17.
8. Махутов Н.А., Резников Д.О. Оценка прочностной живучести технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. № 4. С. 47–57.
9. Райзер В.Д. К проблеме живучести зданий и сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 5. С. 77–78.
10. Стружанов В.В. Об одном подходе к определению живучести технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 1. С. 3–11.
11. Brett C., Lu Y. Assessment of robustness of structures: current state of research. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2013;7(4):356–368.
12. Ghaffarzadeh H., Ghalghachi R.N. Redundancy in steel frames with masonry infill walls. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009;34:923–929.
13. Ghosn M., Fred M., Frangopol D.M. Redundancy and robustness of highway bridge superstructures and substructures. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2010;6(1–2):257–278.
14. Lu D.-G., Cui S.-S., Song P.-Y., Chen Z.-H. Robustness assessment for progressive collapse of framed structures using pushdown analysis methods. *International Journal of Reliability and Safety*. 2012;(1/2/3):15–37.
15. Okasha N.M., Frangopol D.M. Time-variant redundancy of structural systems. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2010;6(1–2):279–301.
16. Starossek U., Haberland M. Evaluating measures of structural robustness. *Proceedings of Structural Congress*. 2009:1758–1765.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-4-4>

Doronin S., Filippova Yu.

SERGEY DORONIN, Candidate of Engineering Sciences, Leading Researcher, AuthorID: 116272, SPIN: 9816-9080, ORCID: 0000-0002-5256-3871, ResearcherID: V-5470-2017, ScopusID: 57193348323, e-mail: sdoronin@ict.nsc.ru
 YULIYA FILIPPOVA, Junior Researcher, AuthorID: 636598, SPIN: 7778-5327, ORCID: 0000-0001-7452-2096, ResearcherID: A-9919-2014, ScopusID: 57193351701, e-mail: filippovajf@ict.nsc.ru
 Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis
Institute of Computational Technologies SB RAS, Krasnoyarsk Branch Office
 53 Mira Av., Krasnoyarsk, Russia, 660049

Survival assessment of structurally complex bearing structures based on damage accumulation scenarios

Abstract: For structurally complex strength structures, a survivability assessment technique is proposed, which includes models of the structures and possible interactions of its constituent elements, analysis of possible limiting states and conditions of failures, identifying scenarios of damage accumulation, developing and studying a logical-computational model of damaged structure behavior. A ranked survivability score has been introduced, taking values of 1 (structural integrity is ensured in the presence of a sequence of damages), 0.5 (structural integrity is ensured with at least one damage), 0 (structural integrity is not ensured with a single damage). Obtaining rank estimates is carried out on the set of all potential scenarios of accumulation of structural damage and includes the determination of both individual ranks for each of the possible scenarios and the potential, systemically determined survivability rank, taking into account all possible outcomes of damage accumulation scenarios. We studied the survivability of a typical joint assembly of the rod elements of the bearing skeleton of a large-sized mirror antenna: the potential survivability rank is 0.66, while the survivability ranks in the considered set of damage accumulation scenarios were 0.5–1.0 depending on the values and the ratio of the pretension force of the bolts and the tensile force in the bearing rod element.

Keywords: structurally complex structures, survivability, damage scenario, computational model.

REFERENCES

1. Berjinsky Yu.A., Berjinskaya L.P. The survivability reserves of the bezelless frame with beyond design impacts. *Earthquake Resistant Constructing. Building Safety*. 2013;3:31–35.
2. Kudishin Yu.I., Drobot D.Yu. Methodology for calculating building structures for unit survivability. *Modern metal and wooden structures (standardization, design and construction): Materials of International Symposium*. Brest, BrSTU, 2009, pp. 132–141.
3. Lepikhin A.M., Moskvichev V.V., Doronin S.V. Reliability, survivability and safety of complex technical systems. *Computational Technologies*. 2009;6:58–70.
4. Machutov N.A., Petrov V.P., Reznikov D.O. Survivability assessment of complex technical systems. *Safety and Emergencies Problems*. 2009;3:47–66.
5. Machutov N.A., Reznikov D.O., Zatsarynniy V.V. Two types of accident scenarios in complex technical systems. *Safety and Emergencies Problems*. 2014;2:28–40.
6. Machutov N.A., Reznikov D.O. Using scenario analysis to assess the strength reliability of complex technical systems. *Engineering & Automation Problems*. 2015;1:4–13.

7. Machutov N.A., Reznikov D.O. Multilevel assessment of survivability of complex technical systems, taking into account the scale-structural hierarchy of damage and destruction accumulation processes. *Safety in Technosphere*. 2016;4:3–17.
8. Machutov N.A., Reznikov D.O. Assessment of strength survivability of technical systems. *Safety and Emergencies Problems*. 2019;4:47–57.
9. Raizer V.D. To the problem of survivability of buildings and structures. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2012;5:77–78.
10. Struzhanov V.V. About one approach to determining the survivability of technical systems. *Safety and Emergencies Problems*. 2009;1:3–11.
11. Brett C., Lu Y. Assessment of robustness of structures: current state of research. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2013;7(4):356–368.
12. Ghaffarzadeh H., Ghalghachi R.N. Redundancy in steel frames with masonry infill walls. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009;34:923–929.
13. Ghosn M., Fred M., Frangopol D.M. Redundancy and robustness of highway bridge superstructures and substructures. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2010;6(1–2):257–278.
14. Lu D.-G., Cui S.-S., Song P.-Y., Chen Z.-H. Robustness assessment for progressive collapse of framed structures using pushdown analysis methods. *International Journal of Reliability and Safety*. 2012;(1/2/3):15–37.
15. Okasha N.M., Frangopol D.M. Time-variant redundancy of structural systems. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2010;6(1–2):279–301.
16. Starossek U., Haberland M. Evaluating measures of structural robustness. *Proceedings of Structural Congress*. 2009:1758–1765.