УДК 539.4

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ПАНЕЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕТКИ ВСТРОЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ*

А.С. Урнев, А.С. Чернятин, Ю.Г. Матвиенко, И.А. Разумовский, М.Ю. Гавриков

В работе изложены методика и результаты экспериментально-расчетного исследования процесса разрушения трехслойной композитной панели с дефектом. Для исследования непосредственно в структуру композитного материала системы встраивались волоконно-оптические датчики (ВОД) деформаций. Рассмотрены вопросы выбора оптимальных шагов сетки датчиков и оценки параметров дефекта на основе результатов измерений деформаций в узлах сетки ВОД. Представлены результаты испытаний панели с искусственным дефектом при циклическом нагружении.

Ключевые слова: слоистые композитные материалы, дефект расслоения, волоконно-оптические датчики, разрушение при циклических нагрузках.

STUDYING THE DESTRUCTION KINETICS OF A COMPOSITE PANEL WITH A EMBEDDED FIBER-OPTIC SENSORS GRID

A.S. Urnev, A.S. Chernyatin, Yu.G. Matvienko, I.A. Razumovskii, M.Yu. Gavrikov

In the paper there are described the methodology and results of the experimental and computation studying the destruction process of a three-layer composite panel with a defect using the fiber-optic deformation sensors grid embedded directly into the composite material. The issues of choosing the optimal sensor grid steps and estimating the defect parameters based on the results of strain measurements at the points of the sensors grid are considered. Test results of the panel with an artificial defect under cyclic loading are presented.

Keywords: layered composite material, delamination defect, fiber-optic sensors, cyclic failure.

Введение

В последние годы отмечается значительное расширение области практического применения композитных материалов (КМ): они находят эффективное применение не только в авиационной и космической технике, но и в других отраслях машиностроения, например, при создании современных строительных конструкций.

В настоящее время в мире не существует единой методики, позволяющей регистрировать процесс возникновения, развития и накопления повреждений элементов конструкций из КМ в процессе эксплуатации изделия [1–5]. Одним из наиболее перспективных способов решения указанной задачи является мониторинг напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции с помощью сетки волоконно-оптических датчиков (ВОД) деформаций, встроенных структуру слоев КМ в процессе их изготовления [6–8 и др.]. При этом в качестве чувствительного элемента волоконно-оптического датчика деформаций выступает участок оптического волокна, внутри которого записана волоконная брэгговская решетка (ВБР), представляющая собой распределенный брэгговский отражатель (разновидность диф-

^{*} Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-00886.

ракционной решетки), сформированный в светонесущей сердцевине оптического волокна [3-5, 9-18]. Использование таких датчиков позволяет проводить непрерывную регистрацию деформаций в соответствующих зонах, дискретно расположенных вдоль оптического волокна. Система регистрации и обработки информации на основе ВОД обеспечивает возможность записи данных о текущем состоянии труднодоступных и высоконагруженных зон соответствующего элемента конструкции, что может стать основой для оценки накопленного повреждения материала и получении сигнала о возможности наступления критического состояния [5, 14–18]. Благодаря использованию встроенной в КМ сетки волоконно-оптических датчиков на основе брэгговских решеток можно регистрировать изменение НДС, которое может привести к появлению дефекта и его дальнейшему развитию [3-5, 14-18]. Также следует отметить, что встроенные ВОД деформаций дают лучший, по сравнению с наклеенными датчиками деформаций, результат [15, 16]. Рассмотренные работы, посвященные аналогичным вопросам [3, 4, 14-17], позволяют судить о вариативности применения ВОД в области машиностроения и многообразии используемых методик, а также о количестве факторов, связанных с эксплуатацией конструкций, которые можно определить с использованием подобных датчиков.

Целью работы, результаты которой представлены в настоящей статье, является апробация методики оценки исходной дефектности и процесса накопления повреждения в элементах конструкций из слоистых КМ на примере исследования типового элемента авиационной техники – трехслойной панели с сотовым наполнителем с применением сетки встроенных ВОД на основе ВБР.

Объект исследования

Объектом исследования являлся конструктивно подобный образец сотовой обшивки крыла самолета Су-57 из полимерного композитного материала (ПКМ), состоящей из верхней и нижней панелей и сотового заполнителя из алюминия (рис. 1).

Панели сотовой обшивки изготовле-12-слойного ИЗ композитного матены риала, состоящего из слоев углепластика и стеклопластика со следующей укладкой: [90°(с)/0/-45/90/45/0/0/45/90/-45/0/90(с)], где (с) обозначает слой стеклопластика, и матрицы на основе эпоксидной смолы. В краезонах панели, которые помещались вых в захваты, была принята следующая укладслоев КМ: [90(с)/0/-45/90/45/0/0/45/90/ка 45/0/90(c)/0/-45/90/45/0/0/45/90/-45/0], симметричная относительно слоя с ориентацией 0°. Данные по механическим характеристикам материалов волокон представлены в табл. 1.





Таблица 1

Материал	ρ, г/см ³	σ ₁ ⁺ , МПа	E_1^+ , ГПа	σ ₂ +, МПа	E_2^+ , ГПа	μ	σ ₁ ⁻ , ΜΠа	<i>E</i> ₁ ⁻ , ГПа	σ ₂ -, МПа	<i>E</i> ₂ ⁻ , ГПа	т ₁₂ , МПа	т ₁₃ , МПа	<i>G</i> ₁₂ , ГПа	G _{1c} , Дж∕м²	G_{2c}
Угле- пластик	1,575	1720	121	71	9,2	0,33	1135	103	320	7,5	98	105	5,3	~210	_
Стекло- пластик	1,65	730	30	410	_	0,17	720	_	_	_	_	56	_	~210	_

Механические характеристики волокон материала

Примечание: ρ – плотность; σ – предел прочности в направлении 1 и 2 на растяжение (+) и сжатие (-); *E* – модуль упругости в направлении 1 и 2 на растяжение (+) и сжатие (-); μ – коэффициент Пуассона; τ – максимальное касательное напряжение; *G* – модуль сдвига; *G*_{1c} – ударная вязкость.

Характеристики приведены для слоя КМ, в котором направление 1 – по направлению волокна, 2 – перпендикулярно волокну. Оси *x* и *y* на рис. 1 в глобальной системе координат, без привязки к слоям, которые имеют различную ориентацию, в зависимости от укладки.

Расположенный между верхней и нижней панелями наполнитель представлял собой конструкции из алюминиевой фольги в виде сот, имеющих форму правильного шестиугольника со стороной a = 2,5 мм; толщина ячейки (фольги) $\delta_{\phi} = 0,03$ мм. При расчетах общивки крыла самолета Су-57 сотовый заполнитель рассматривался как однородный ортотропный материал с приведенными механическими характеристиками. Эти механические характеристики были вычислены путем расчетов НДС на основе метода конечных элементов (МКЭ), выполненных при нагружении элемента сотовой структуры единичными нагрузками, действующими в направлениях x, y, z. Расчеты выполнялись в программном комплексе (ПК) ANSYS. Полученные приведенные и принятые для дальнейших расчетов механические характеристики для рассматриваемой панели имеют следующие значения: E = 69,6 МПа, G_{yy} = 0,27 МПа, $G_{\mu\nu} = 0,15 \text{ M}\Pi a, \mu = 0,32.$

В качестве исходного дефекта рассматривался наиболее часто встречающийся в слоистых КМ дефект расслоения [19].

Исследования базируются на комплексном подходе к решению поставленной задачи, включающем следующие этапы:

a) определение шагов сетки ВОД для обнаружения дефекта;

б) регистрация показаний ВОД деформаций, расположенных в узлах сетки;

в) математическая обработка информации, на основе которой делается заключение о наличии (или отсутствии) дефектов, определяются зона их локализации и геометрические параметры.

Расчеты НДС образца, включающего верхнюю и нижнюю панели, сотовый наполнитель и возможные дефекты расслоения, выполнялись с использованием ПК *ANSYS*. Общий вид схемы конечно-элементного разбиения (КЭ-разбиения) образца приведен на рис. 2.

В КЭ-модели предусмотрена возможность расположения одного или нескольких дефектов как в нижней, так и в верхней панелях. При этом использовалась разработанная авторами методика моделирования НДС в зоне дефекта расслоения слоистых КМ, позволяю-



20

динамика и прочность машин

щая многократно увеличить скорость расчетов при сохранении необходимой точности результатов. Главная особенность этой концепции моделирования дефектных элементов расслоения заключается в использовании оболочечных композитных элементов (плоский четырехузловой оболочечный КЭ с шестью степенями свободы в каждом узле и опциями слоистого композиционного материала типа Shell181 в среде ANSYS) вместо объемных элементов (например, Solid186 – двадцатиузловой КЭ с тремя степенями свободы в каждом). Методические основы соответствующего подхода, позволяющего осуществить моделирование дефектов в панелях из слоистого композитного материала путем редукции трехмерной задачи к двухмерной, структурная схема специализированной программы решения рассматриваемой задач, а также результаты решения тестовых задач изложены в работе [20].

Методика определения параметров дефекта на основе результатов измерений деформаций с использованием сетки ВОД

Решение задачи оценки размеров и зоны расположения дефектов в слоистых КМ основано на применении разработанного специалистами ИМАШ РАН экспериментально-численного метода определения параметров нагруженности и дефектности материала исследуемого объекта на основе математической обработки экспериментальных данных [21–23]. Одним из важнейших условий успешного решения поставленной задачи является возможность получения значительных объемов экспериментальной информации, характеризующих изменения полей деформаций или перемещений, обусловленных появлением и развитием дефектов и других воздействий.

В адаптированном виде, применительно к задаче оценки размеров дефекта расслоения, указанный методический подход позволяет на основе математической обработки данных эксперимента e_i^* вычислить величины параметров P_j^* , характеризующих заданные геометрические характеристики дефекта – форму и размеры осей контура дефекта, рассматриваемого в виде эллипса, а также расположение дефекта в исследуемой зоне рассматриваемого объекта области (без учета глубины залегания).

В рассматриваемом случае массив e_i^* представляет собой деформационные отклики

в узлах встроенной в исследуемый объект сетки ВОД деформаций.

В основе метода лежит положение о том, что существует прямая физическая взаимосвязь между P_i^* и e_i^* , то есть

$$e_i^* = F_i^*(P_i^*) \,. \tag{1}$$

Таким образом, рассматриваемый подход реализует решение обратной задачи

$$P_i^* = F_i^{(*-1)}(e_i^*).$$
(2)

Заметим, что массив включает массив экспериментальных погрешностей E_{rr} , который может носить систематический или случайный характер, и связан с экспериментальной процедурой определения величин e_i^* (через параметры эксперимента p):

$$E_{i}^{*} = F_{i}^{*}(P_{i}^{*}) + E_{rr}(P_{i}^{*}, F_{i}, p).$$
(3)

В процессе решения задачи проводится численное (неявное) определение функциональной зависимости F, воспроизводящей зависимость F^* (в рамках принятой постановки задачи), на основе серии расчетов с использованием МКЭ серии соответствующих краевых задач при текущих значениях параметров P_i :

$$e_i = F_i(P_i). \tag{4}$$

С целью оптимизации процедуры определения зависимости (4) используется так называемый «банк откликов», что позволяет существенно уменьшить вычислительные затраты на получение решения прямой задачи [24].

Решение обратной задачи строится как минимизация некоторой целевой функции, комплексно отражающей разность между параметрами e_i^* и e_i :

$$I = I(e_i, e_i^*).$$
 (5)

Решение задачи сводится к последовательному подбору значений параметров $P_j = P_j^k$ (k – номер итерационного шага), при которых численное решение прямой задачи ($e_i = e_i^k$) будет наиболее точно совпадать с исходными данными (e_i^*)). Текущие значения P_j^k на каждом этапе определяются согласно алгоритму минимизации, а значения $P_i^k = P_i'$, при которых целевая функция достигает минимума $I = I^*$, считаются решением искомой обратной задачи [21, 22, 24]. В качестве целевых функций принимаются нашедшие наиболее широкое применение на практике нормы – среднеквадратическое или максимальное отклонения \tilde{e}_i , а также функции специального вида [23].

В качестве базового (но не единственного) метода для разработанного вычислительного комплекса используется метод деформируемых симплексэлементов (метод Нелдера – Мида) [24].

Отметим, что получаемое таким образом решение обратной задачи сводится к расчету серии прямых задач, исключая проблемы устойчивости, всегда возникающие при решении уравнений типа (3).

Особенности адаптированного применительно к решаемой задаче вычислительного комплекса (ВК), состоящего из ряда макросов для ПК ANSYS и программ с графическим интерфейсом для ПК MATLAB, которые в совокупности образуют единый программный продукт, изложены в работе [26]. Разработанные алгоритмы обладают значительной универсальностью, что обеспечило успешное применение ВК для решения задачи идентификации параметров дефекта. Важным обстоятельством является то, что функциональные возможности разработанного ВК в совокупности охватывают все этапы математической обработки экспериментальной информации, включая требования к объему, точности и характеристикам зоны локализации исходных экспериментальных данных, обеспечивающих надежное определение искомых параметров.

Следует отметить, что для решения поставленной задачи алгоритм определения параметров был реализован как многостадийный процесс математической обработки показаний множества ВОД [26].

Определение шагов сетки ВОД

Величины шагов сетки, в узлах которой расположены ВОД, используемые при проведении экспериментов, определяются из условия обеспечения возможности получения достаточного по объему и точности массива экспериментальных данных, последующая математическая обработка которых позволяет определить зоны локализации и размеры дефектов расслоения. Исходными данными для расчета параметров сетки ВОД являются:

- геометрия исследуемого объекта;

- механические характеристики материалов;

 типы и величины нагрузок (напряжений), действующих в исследуемой зоне рассматриваемой конструкции;

 – форма и минимальные размеры дефекта расслоения (при этом считается, что в пределах одной ячейки ВОД располагается один дефект);

- чувствительность ВОД.

При проведении экспериментов использовались ВОД на основе ВБР с порогом чувствительности $\varepsilon_0 = 10^{-6}$.

Для оценки оптимальных (в данном случае максимальных) шагов сетки ВОД был использован методический подход, реализованный в алгоритме и соответствующем программном обеспечении, которые изложены в работе [26]. При этом анализ НДС в зоне дефекта расслоения, и, соответственно, изменения величин деформационных откликов в узлах сетки ВОД, обусловленные возникновением и развитием дефекта, определялись с использованием разработанного авторами подхода и специализированной программы, рассмотренных в работе [20].

При расчетах шагов сетки ВОД рассматривались круговые дефекты площадью 2 см², расположенные как в нижней, так и в верхней пластинах (при этом предполагалось, что датчики расположены только на нижней пластине).

Результаты расчетов показали, что величина максимальных деформаций, обусловленных появлением дефектов рассматриваемого типоразмера в верхней панели $\varepsilon_{x,y}^{max} \approx 6 \cdot 10^{-7}$ существенно ниже чувствительности используемых ВОД деформаций, даже под воздействием нагрузки, которая превышает предельную для используемых ПКМ. Следовательно, судить о появлении и дальнейшем развитии дефекта в какой-либо панели (верхней или нижней) можно только по результатам измерений с помощью ВОД, расположенных непосредственно в этой панели.

Экспериментальное исследование предусматривало установку сетки ВОД только внутри нижней (плоской) панели. Результаты расчетов оптимальных шагов сетки ВОД в направлениях *x* и *y*, проведенных для трех вариантов расположения дефекта в нижней панели (под 3-м, 6-м и 9-м слоями) в зависимости от величины растягивающих напряжений σ_x (6 МПа $\leq \sigma_y \leq 18$ МПа) представлены на рис. 3.

Проведение эксперимента

В образце между 6-м и 7-м слоями путем вклейки специальной пленки с антиадгезионными свойствами создавался исходный дефект в виде круга диаметром 9,5 мм. Координаты центра образца x = 249 мм, y = -29 мм (см. рис. 1, *a*). Перед началом испытаний был произведен ультразвуковой контроль размеров дефекта, который подтвердил, что его размеры $\sim 9,5$ мм в продольном и поперечном направлениях.

22

динамика и прочность машин

С учетом результатов предварительно проведенных расчетов шагов сетки ВОД, выполненных в соответствии с методикой, изложенной в работе [25] (рис. 3), были приняты следующие шаги сетки ВОД для измерения деформаций ε_x и ε_y : $H_x = 50$ мм, $H_y = 80$ мм. Схема расположения ВОД деформаций показана на рис. 1, δ .

При испытаниях образец нагружался по схеме трехточечного изгиба (см. рис. 1, *a*) вплоть до разрушения. Режимы циклических испытаний по регламенту испытаний представлены в табл. 2. Циклические испытания проводили на испытательной машине *Instron 8802* (рис. 4).

Таблица 2



Режим нагружения	Диапазон изменения нагрузки <i>F</i> , кН	Количество циклов N
1	0,5–3,4	1158
2	0,5–3,8	794
3	0,5–4,4	526
4	0,5–3,0	296
5	0,5–4,4	196



Рис. 3. Зависимости максимального шага $H_{x,y}$ сетки в направления x и y от напряжений (нагрузки) при расположении дефекта под 3-м (1), 6-м (2) и 9-м (3) слоями



Рис. 4. Испытательная машина Instron 8802 с образцом композитной панели (a), образец (б) и вид нижней панели с ВОД и аппаратурой (в)

Для съема исходной информации с встроенной в структуру КМ нижней панели сетки ВОД (см. рис. 1, б) использовался блок-регистратор, разработанный специалистами ООО НИЦ «ИРТ» на основе широкополосного лазера и спектрометра.

В процессе испытаний в режиме реального времени проводилась запись показаний ВОД деформаций в узлах сетки. На основе математической обработки этих показаний определялись:

 моменты образования новых дефектов (при этом считалось, что дефекты имеют форму эллипса);

– расчеты параметров, определяющих положение центра дефекта (x_{i}, y_{j}) ;

– размеры дефектов (d_x, d_y) , при этом считалось, что они имеют форму эллипса.

Были получены временные зависимости деформаций ε_x , зарегистрированные расположенным вблизи исходного дефекта ВОД № 9 (см. рис. 1, δ) на начальной стадии эксперимента (рис. 5, a) и перед разрушением образца (рис. 5, δ). Результаты обработки этих зависимостей показывают, что среднее значение деформаций в начале эксперимента было равно $\varepsilon_{\delta}^{start} \approx -1,75 \cdot 10^{-6}$, а перед разрушением $\varepsilon_{\delta}^{fm} \approx -2,3 \cdot 10^{-6}$ (что всего лишь в два раза превышает пороговую величину).

Следовательно, в соответствующем узле сетки ВОД деформационный отклик изменяется на ~30 %, что, вероятно, связано с влиянием вновь образовавшихся дефектов, поскольку, как было экспериментально установлено, относительный прирост размера этого дефекта составил всего ~10 %. Для определения параметров x_i , y_i , d_x , d_y использовались указанные выше методики и программы с предварительно откалиброванными параметрами используемой математической модели. На рис. 6 показаны скриншоты экрана дисплея, показывающие зарегистрированные измерительной аппаратурой картины, характеризующие поврежденность нижней панели.

На завершающих циклах 5-го режима испытаний система зафиксировала критическое состояние образца (см. рис. 5, δ), после чего произошло его разрушение. Здесь следует отметить, что в процессе циклических испытаний на их заключительном этапе нагружения (5-й режим в табл. 2) наблюдалось возникновение и развитие значительного количества дефектов в зоне максимальных напряжений, расположенной справа от линии приложения нагрузки F (при $x \ge 285$ мм), что, возможно, связано с качеством изготовления образца.

Отметим, что в связи с возникновением большого количества дефектов в зоне приложения нагрузки (зоне максимальных напряжений), стало невозможным надежное определение их геометрических параметров.

Изображение на рис. 6, *а* свидетельствует, что в пределах элемента сетки ВОД имеется только один дефект. На рис. 6, *б* дефекты отнесены к трем условным группам: «допустимого» размера (размер которых в направлении $y - A < 2 \text{ см}^2$), «предельно допустимого размера» ($A \approx 2 \text{ см}^2$) и превышающего предельно допустимый размер ($A > 2 \text{ см}^2$). Такую классификацию следует считать весьма приближенной, так как при разработке модели, связыва-



Рис. 5. Зависимость деформаций, зарегистрированных ВОД № 9 (см. рис. 1, δ), от времени на начальной стадии эксперимента (a) и перед разрушением образца (δ)

динамика и прочность машин

24





Рис. 6. Скриншоты картин поврежденности нижней панели образца: а) исходное состояние, б) непосредственно перед разрушением: ○ – дефекты, максимальный размер которых $d_y < 10$ мм; ● – $d_y \approx 10$ мм; ● – $d_y > 10$ мм

ющей деформационные отклики в узлах сетки с параметрами дефекта x_i , y_i , d_x , d_y считалось, что в пределах одной ячейки возникает только один дефект расслоения.

Заключение

Результаты исследования показывают, что разработанные методические подходы и соответствующие программы в совокупности с использованными при проведении лабораторного эксперимента средствами измерения деформаций с помощью волоконно-оптических датчиков и специализированной регистрирующей аппаратуры могут стать реальной основой для мониторинга процесса возникновения дефектов и процесса накопления повреждения в элементах конструкций из слоистых КМ.

Установлено, что применение системы ВОД позволяет определить момент возникновения дефекта и зону его расположения в случаях, когда имеет место развитие одиночных дефектов.

В случаях, когда в определенных зонах исследуемого объекта состояние материала исследуемого объекта приближается к критическому (или достигает его), система встроенных ВОД позволяет определить момент начала разрушения и установить область предразрушения.

На основе анализа результатов проведенного исследования можно сделать вывод об актуальности дальнейшего развития разработанных методов и программ применительно к случаю, когда в пределах одной ячейки сетки ВОД возникает несколько дефектов.

Список литературы

- Матвиенко Ю.Г. Тенденции нелинейной механики разрушения в проблемах машиностроения. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. – 56 с.
- 2. *Чернышев С.Л.* Новый этап применения композиционных материалов в авиастроении// Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 1. С. 3–10.
- 3. *Jang, B.-W., Kim, C.-G.* Real-time estimation of delamination occurrence induced by low-velocity impact in composite plates using optical fiber sensing system // Composite Structures. 2018. No 189. P. 455–462.

- Use of FBG sensors for delamination growth measurement under mode I loading / M. Dvořák, N. Schmidová, M. Kadlec, M. Růžička // EAN 2017 – 55th Conference on Experimental Stress Analysis. 2017. P. 102–106.
- Detection of delamination in a composite material based on the measurement of static strain using a surface-mounted fiber Bragg grating sensor / W. Rong, Y. Wang, J.H. Ng, W. Kang, V. Paulose // Optical Engineering. 2011. 50 (1). Art. № 014404.
- 6. *Hill K.O., Meltz G.* Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview // J. Lightw. Technol. 1997. No 15. P. 1263–1276.
- Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2001. – 272 с.
- Lvov N.L., Khabarov S.S., Gavrikov M.Yu. Creation of an integrated system for monitoring the technical condition of high-quality helicopter units based on fiber-optic technology // International Journal of Engineering & Technology Science Publishing Corporation Inc. 2018. V. 7. No 4.38. P. 1162–1166.
- High-Strain Fiber Bragg Gratings for Structural Fatigue Testing of Military Aircraft / C. Davis, S. Tejedor, I. Grabovac, J. Kopczyk and T. Ravis // Photonic Sensors. 2012. Vol. 2. N. 3. P. 215–224.
- Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Дианов Е.М., Васильев С.А., Медведков О.И. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. № 3. URL: http://www.viam.ru/public (дата обращения: 25.11.2019).
- Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. −520 с.
- Proof of Concept of Impact Detection in Composites Using Fiber Bragg Grating Arrays / J. Gomez, I. Jorge, G. Durana, J. Arrue, J. Zubia, G. Aranguren, A. Montero and I. López // Sensors. 2013. No 13. P. 11998–12011.
- Buckling behaviour monitoring of a composite wing box using multiplexed and multi-channeled built-in fiber Bragg grating strain sensors / *C.Y. Ryu, J.R. Lee, C.G. Kim, C.S. Hong //* NDT&E Int. 2008. No 41. P. 534–543.
- 14. Embedded fibre Bragg grating sensors as a tool for structural health monitoring of complex

composite structures / M. Mieloszyk, M. Jurek, K. Majewska, W. Ostachowicz // Proceedings of the 7th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, APWSHM. 2018. P. 108–119.

- Strain measurement in unidirectional carbon fibre utilising embedded optical strain gauges / P.R. Cook, A. Alavija, S.J. Wildy, J.W. Arkwright // 9th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM. 2017. November. Sydney: Engineers Australia, 2017. P. 148–155.
- 16. Jones B.H., Rohr G.D., Kaczmarowski A.K. Sensing delamination in epoxy encapsulant systems with fiber Bragg gratings// Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2016. 9852. Art. № 98520G.
- 17. *Silva-Muñoz R.A., Lopez-Anido R.A.* Structural health monitoring of marine composite structural joints using embedded fiber Bragg grating strain sensors // Composite Structures. 2009. No 89 (2). P. 224–234.
- Mizutani T., Hayashi K., Nishi T., Takeda N., Tanaka K., Namiki F. Structural health monitoring for composite pressure vessels using fiber optic sensors// International Astronautical Federation – 56th International Astronautical Congress. 2005. No 6. P. 3735–3742.
- 19. Полилов А.Н. Экспериментальная механика композитов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 375 с.
- 20. Моделирование трещиноподобных дефектов в слоистой композитной конструкции / *А.С. Урнев, А.С. Чернятин, Ю.Г. Матвиенко, И.А. Разумовский* // Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 3. С. 26–34.
- 21. Чернятин А.С., Разумовский И.А. Комплексный анализ элементов конструкций с поверхностными трещинами// Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 1. С. 66–76.
- 22. Chernyatin A.S. and Razumovskii I.A. Methodology and Software Package for Assessment of Stress-Strain State Parameters of Full-Scale Structures and Its Application to a Study of Loading Level, Defect Rate, and Residual Stress Level in Elements of NPP Equipment // Strength of Materials. 2013. No. 4. P. 506–511.
- 23. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Экспериментально-расчетный метод исследования остаточных напряжений в двухслойных элементах конструкций способом сверления отверстия // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 4. С. 101–109.

динамика и прочность машин

- 24. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Методология и программа для определения параметров напряженно-деформированного состояния на основе обработки экспериментальных данных// Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 4. С. 26–32.
- 25. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инжене-

ров: учеб. пособ. М.: Высшая школа, 1994. – 554 с.

26. Экспериментально-численное определение размеров дефектов типа расслоения в слоистых композитных материалах / А.С. Урнев, А.С. Чернятин, Ю.Г. Матвиенко, И.А. Разумовский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Том 84. № 10. С. 59–66.

УРНЕВ Александр Сергеевич E-mail: Urnev-AS@yandex.ru Тел.: (905) 597-90-92	Аспирант Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, инженер 2 категории АО «НИКИЭТ» им. Н.А. Доллежаля. Сфера научных интересов: численные методы механики разрушения, прочность и трещиностойкость элементов конструкций из композитных материалов. Автор 12 научных пуб- ликаций.
ЧЕРНЯТИН Александр Сергеевич Е-mail: cas@inbox.ru Тел.: (905) 757-65-40	Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ООО «НИИ Транс- нефть». Сфера научных интересов: численные и экспериментально-расчет- ные методы анализа напряженно-деформированного состояния, обратные задачи механики деформируемого твердого тела, механика разрушения. Автор более 35 публикаций в отечественных и зарубежных научных из- даниях.
МАТВИЕНКО Юрий Григорьевич Е-mail: matvienko7@yahoo.com Тел.: (499) 135-12-04	Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, за- ведующий отделом «Прочность, живучесть и безопасность машин» Инсти- тута машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов: нелинейное физико-математическое моделирование, мониторинг и иерар- хическая система критериев повреждений и разрушения материалов и кон- струкций на различных масштабно-структурных уровнях, комплексные критерии, методы анализа и нормирования прочности, живучести, безопас- ности и ресурса машин и конструкций в сильно поврежденных состояниях в условиях экстремальных физико-механических воздействий и коррози- онных сред. Автор более 300 научных публикаций, из них 15 монографий и 13 авторских свидетельств на изобретения.
РАЗУМОВСКИЙ Игорь Александрович E-mail: murza45@gmail.com Тел.: (499) 135-62-98	Доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией механики разру- шения и живучести Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов: экспериментальные и экспериментально-рас- четные методы исследования напряженно деформированного состояния с использованием оптико-интерференционных методов; механика разруше- ния, методы анализа полей остаточных напряжений; прочность и трещино- стойкость многослойных конструкций. Автор более 150 научных публикаций в отечественных и международных изданиях, в том числе восьми учебных пособий, восьми коллективных и двух авторских монографий.
ГАВРИКОВ Михаил Юрьевич E-mail: gavrikov.m@gmail.com Тел.: (916) 935-42-04	Аспирант кафедры 602 «Проектирование и прочность авиационно-ракетных и космических изделий» Московского авиационного института, ведущий ин- женер-конструктор ООО НИЦ «ИРТ». Сфера научных интересов: накопление повреждений и деградация упругих и прочностных свойств композиционных материалов, механика разрушения композитных конструкций, разработка систем диагностики авиационных конструкций. Автор трех научных публи- каций и пяти патентов на изобретения и полезные модели.