

УДК 539.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ В СЛОИСТОЙ КОМПОЗИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ*

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

В статье предложены методический подход и алгоритм программы для моделирования дефектов типа расслоения в конструкциях из волокнистых композиционных слоистых материалов, которые обеспечивают анализ напряженно-деформированного состояния конструкции в зоне дефекта и могут быть эффективно использованы для расчетов, связанных с оценкой изменения геометрических параметров дефектов в процессе их развития. Для моделирования используются двумерные конечные элементы, которые по сравнению с трехмерным анализом обеспечивают возможность использования конечно-элементных моделей конструкции меньшей размерности при сохранении всех особенностей напряженно-деформированного состояния. Представлены результаты решения ряда тестовых задач, которые показали, что предлагаемый подход позволяет существенно сократить вычислительные затраты при определении напряженно-деформированного состояния конструкции, сохраняя необходимую точность результатов. Разработанный алгоритм может быть использован при создании системы мониторинга состояния и оценки остаточного ресурса конструкций из композиционных материалов.

Ключевые слова: слоистые композиты, расслоение, численные методы, напряженно-деформированное состояние, двумерное моделирование.

COMPUTER SIMULATION OF CRACK-LIKE DEFECTS IN THE LAMINATED COMPOSITE MATERIAL

A.S. Urnev, A.S. Chernyatin, Yu.G. Matvienko, I.A. Razumovsky

Methodological approach and algorithm for delamination defect modelling in layered fiber composite panels have been proposed, that allow the further strain-stress state analysis and defect characteristics estimation. The approach is based on algorithm that provides for using 2D finite elements instead of 3D-models, allowing to create one less dimension of finite element model of structure while retaining all strain-stress state aspects. It is shown that this approach allows the significant increasing the speed of strain-stress state problems calculation at required accuracy of results. Developed algorithm can be used at creation of system for monitoring the composite material structures condition and estimating their residual life.

Keywords: layered composites, delamination, numerical simulation, stress-strain state, the two-dimensional modeling.

Введение

В последние десятилетия композиционные материалы (КМ) стали одними из основных материалов для современных и перспективных конструкций, находя применение не только в свойственных для них авиационной и космической технике, но и в различных отраслях машиностроения, приборостроения, биомедицины и др. Главным преимуществом

композитов по сравнению с традиционными конструкционными материалами является высокая удельная прочность [1]. Кроме того, важной особенностью слоистых КМ является их способность препятствовать росту трещины. Однако на этапе изготовления или во время эксплуатации конструкции возможно образование таких дефектов, как межслойное разделение, расслоение, которые под воздействием цикли-

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

ческих нагрузок могут развиваться до размеров, представляющих опасность для конструкции. Современные требования к обеспечению прочности и повышения ресурса конструкций из КМ (в первую очередь, авиационных) обуславливают необходимость создания методической и программной основы для разработки системы мониторинга их состояния в процессе эксплуатации, обеспечивающей возможность регистрации возникновения дефектов и зоны их локализации, и затем – изменения геометрических параметров дефектов в процессе их дальнейшего развития [2].

Очевидно, что чем сложнее и ответственнее конструкция, тем более высокие требования предъявляются к надежности информации о ее реальном состоянии, которая в условиях эксплуатации может значительно отличаться от расчетного. Это обусловлено различными факторами: неточностями принятой расчетной схемы, наличием остаточных напряжений, деградацией свойств материала, наличием дефектов и т.д. В особенности это относится к конструкциям, длительное время находящимся в эксплуатации, когда имеет место повреждение в наиболее нагруженных зонах.

Рассматривая различные методы оценки дефектности конструкций, можно заключить, что в основном они базируются на изначально заданных физических и деформационных моделях материала и конструкции. Поэтому, насколько точно и полно они описывают реальное состояние рассматриваемых объектов, во многом определяет точность получаемых оценок прочности и ресурса конструкции.

В работах [3-5] предложена методика, предполагающая построение модели деформируемого объекта с учетом различных особенностей воздействия, наличия дефектов и остаточных напряжений, однако ее эффективность во многом зависит от полноты информации о деформационном отклике при различных сочетаниях разнотипных параметров. Для определения массива деформационных откликов, регистрируемых в процессе работы исследуемого объекта, в принципе, могут быть использованы различные методы: от тензометрии до современных оптико-корреляционных методов [6, 7], позволяющих получать практически неограниченные объемы информации о деформированном состоянии поверхности объекта бесконтактным способом. Вместе с тем, очевидно, что наиболее перспективным методом регистрации дефор-

мационных откликов в элементах конструкций из КМ следует признать применение волоконно-оптических датчиков деформаций (ВОД), встроенных непосредственно в композиционный материал, что открывает возможность измерения деформаций непосредственно в процессе эксплуатации конструкции [8–10].

При использовании рассмотренного в работах [3–5] подхода для мониторинга натурной конструкции появляется необходимость крайне быстрой и качественной обработки информации, поступающей от множества датчиков, расположенных по всей конструкции. Это приводит к необходимости быстрого и достаточно точного решения различных краевых задач в процессе эксплуатации объекта по текущей информации, регистрируемой датчиками.

Практическое использование такого подхода требует наличия значительных вычислительных и временных ресурсов. Последнее требование еще в большей степени относится к анализу элементов из КМ – материалов, которые создаются индивидуально под каждую зону конструкции, что обуславливает огромную вариативность геометрических параметров, укладки волокон, не говоря о сложном характере возникновения и развития дефекта и особенности его моделирования.

В качестве дефекта в работе рассматривался наиболее часто встречающийся в практике эксплуатации элементов конструкций из КМ – дефект типа расслоения [11–13].

В настоящее время в работах, посвященных конечно-элементному моделированию деламинации, в том числе, с учетом выпучивания [14] и отделения стрингера от композитной панели [15], используются когезионные элементы, то есть конечные элементы (КЭ), моделирующие взаимодействие и характер связей между расслаивающимися поверхностями. В работах [16–19] изложены результаты исследования разрушения образцов из КМ с расслоением и их трещиностойкости; при этом моделирование расслоения основано на *CZM (Cohesive Zone Model)* подходе с использованием оболочечных элементов. Также существуют попытки создания новых типов элементов [20], которые позволяют учесть новые модели разрушения связей между расслаивающимися слоями КМ, используемых для моделирования роста деламинации в КМ. В работе [21] с применением метода конечных элементов (МКЭ) исследуются вопросы зарождения и развития дефектов

с использованием *CZM*-подхода и проводится сравнение с экспериментальными данными. В статье [22] на основе расчета с использованием 3D-моделей и ПК *ANSYS* рассмотрено распределение напряжений при выходе расслоений на границу пластин из КМ, а также дается анализ расслоения с точки зрения высвобождения энергии деформации. В работе [23] проведено сопоставление результатов численного моделирования расслоения КМ, полученных методами *CZM* и *VCCT* (*Virtual Crack Closure Technique*), выполненных для оценки снижения параметров жесткости конструкции.

Целью данной работы является представление разработанных методического подхода и вычислительного алгоритма для расчетного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) в области трещиноподобных дефектов в слоистых композитных тонкостенных конструкциях на основе двухмерного конечно-элементного моделирования.

Алгоритм моделирования слоистой конструкции с дефектом

В работе конечно-элементный анализ композитной тонкостенной конструкции выполнялся в ПК *ANSYS* с использованием разработанных специализированных макросов на языке *APDL*. Предлагаемый алгоритм моделирования дефекта типа расслоения, характеризуемого локальным нарушением связей между слоями КМ и возникновением границы раздела (полости) между двумя слоями, представлен на рис. 1. Реализация алгоритма производится следующим образом. Бездефектная область КМ моделируется оболочечными конечными элементами, для которых указывается весь набор монослоев КМ (имеется N слоев). В дефектной области задается контур дефекта, и создаются две не совпадающие поверхности (обозначаемые как «*bot*» и «*top*», соответственно нижняя и верхняя) с едиными по контуру границами, через которые они «пристыковываются» к бездефектной области. Обе поверхности в области дефекта также моделируются оболочечными слоистыми элементами, но одна поверхность имеет набор из N_{bot} слоев, лежащих ниже поверхности раздела, а другая поверхность имеет N_{top} слоев, расположенных выше, т.е. $N_{bot} + N_{top} = N$. На поверхностной границе раздела также можно ввести контактную группу, а вдоль контура дефекта – когезионные элементы. Посредством соответствующего задания плоскости

приведения узловых сил и перемещений для двух групп слоев «*bot*» и «*top*» удастся учесть взаимное их расположение по толщине, несмотря на то, что моделирующие их элементы геометрически лежат в одной плоскости модели (соответственно вся КЭ модель является плоской) и согласовать плоскость приведения дефектной области с бездефектной. Заметим, что предложенный подход моделирования расслоения, в частности, может быть применен к моделированию «выпучивания», то есть позволяет учитывать локальную потерю устойчивости отслоившейся группы слоев (например, N_{bot}), находящихся в условиях сжимающих напряжений. В зависимости от вида нагружения и учета симметрии на контурах пластины могут накладываться соответствующие ограничения на линейные и угловые перемещения, т. е. кинематические связи.

Главная особенность предлагаемого подхода в моделировании дефектных областей композитной конструкции с расслоением заключается в использовании оболочечных композитных элементов (плоский четырехузловой оболочечный КЭ типа *Shell181* в среде *ANSYS*, имеющий шесть степеней свободы в каждом узле и опции слоистого композиционного материала) [24, 25] вместо объемных композитных элементов (например, *Solid186* – двадцатиузловой КЭ с тремя степенями свободы в каждом узле), что позволяет существенно снизить вычислительные ресурсы, сохраняя точность моделирования деформированного состояния в зоне дефекта и расширенные возможности приложения нагрузок. Таким образом, такой подход допускает использовать 2D-элементы в более широком спектре задач и расчетов.

Решение модельных задач

С применением разработанного подхода было проведено численное решение ряда модельных задач о НДС конструктивных элементов из КМ с дефектами типа расслоения различной конфигурации, а также выполнены расчеты нескольких реальных конструкций, результаты которых позволили установить ряд закономерностей влияния размеров, формы и расположения дефектов на характер и параметры НДС в зоне дефекта [26, 27].

В качестве примера приведем результаты решения двух модельных задач о НДС в зоне дефекта типа расслоения в форме эллипса в пластине из слоистого КМ с использовани-



Рис. 1. Схема алгоритма моделирования и расчета НДС композитной конструкции в зоне дефекта (типа расслоения) с использованием 2D-модели

ем моделей двух типов: 3D-модели и 2D-модели. Схемы нагружения пластины – осевое растяжение номинальными напряжениями σ и поперечный изгиб моментом M_y – приведены на рис. 2.

Композитная пластина состоит из 26-ти одинаковых монослоев, со схемой укладки

[45/-45/0/90/0], симметричной относительно середины пакета. Механические характеристики монослоя материала: модуль упругости вдоль волокон $E_1 = 121$ ГПа, модуль упругости поперек волокон $E_2 = 9,2$ ГПа, модуль сдвига в плоскости армирования $G_{12} = 5,3$ ГПа, модули поперечного сдвига $G_{13} = G_{23} = 5,3$ ГПа, коэф-

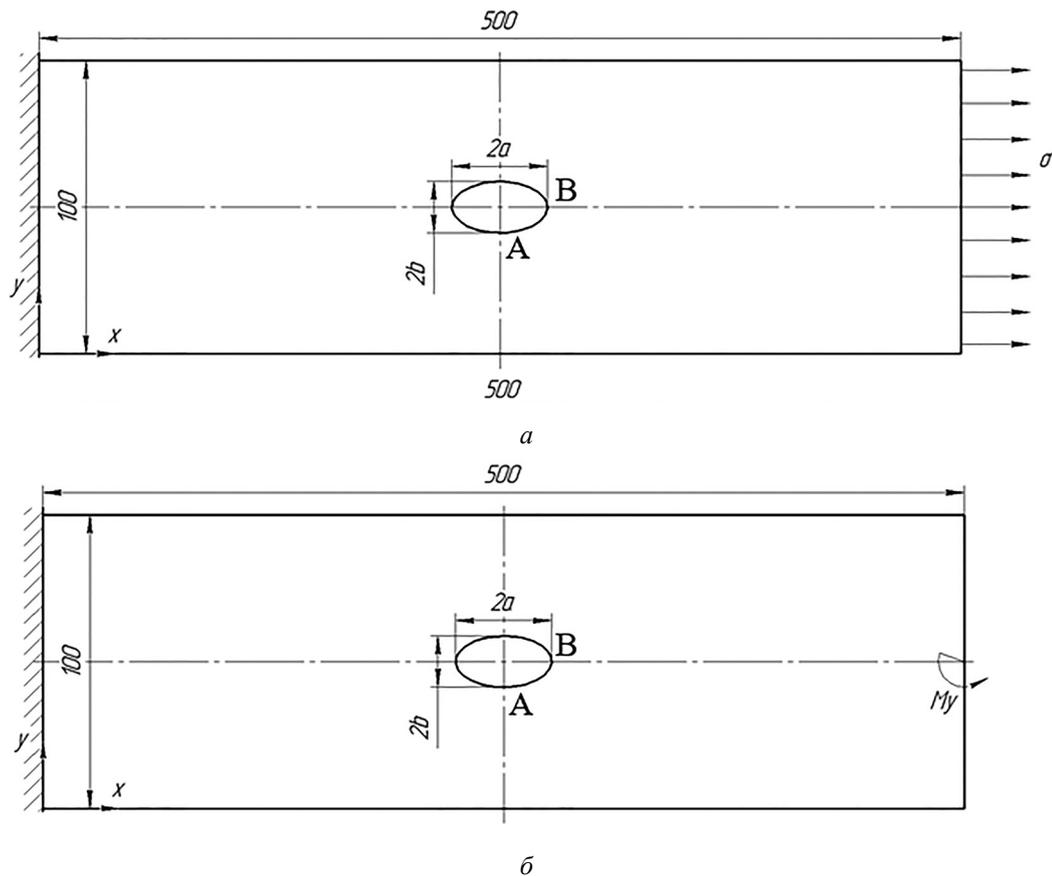


Рис. 2. Варианты нагружения композитной пластины с эллиптическим дефектом:
 а – осевое растяжение; б – поперечный изгиб

коэффициенты Пуассона $\mu_{12} = \mu_{13} = 0,33$. Толщина композитной пластины $h = 5,2$ мм, площадь дефектов составляла 4 см^2 , полуоси эллипса a и b ориентированы вдоль осей x и y соответственно. Расчеты проводились для ряда соотношений между размерами полуосей эллипса:

$$0,5 \leq \frac{a}{b} \leq 2,5.$$

При расчете принимались следующие значения нагрузки на удалении от дефекта: при растяжении $\sigma = 1$ МПа, при изгибе $M_y = 500$ Н·м.

При этом, с целью возможности последующего сопоставления временных затрат, требуемых на решение задачи, конечно-элементное разбиение пластин в плоскости x, y задавалось идентичным образом (рис. 3, а и 3, б соответственно).

Была рассмотрена задача о НДС пластины в зоне дефекта указанного типа, расположенного между 6-м и 7-м слоями (отсчет слоев от нижней поверхности), в растягиваемой и изгибаемой пластинах. При конечно-элементном моделировании пластины в окрестности зоны

дефекта создавалась нерегулярная сетка конечных элементов со сгущением вдоль контура дефекта, что обеспечило возможность более точного определения НДС, а в областях, удаленных от дефекта, использовалась упорядоченная сетка относительно крупных конечных элементов.

Полученные на основе проведенных расчетов величины деформаций в характерных

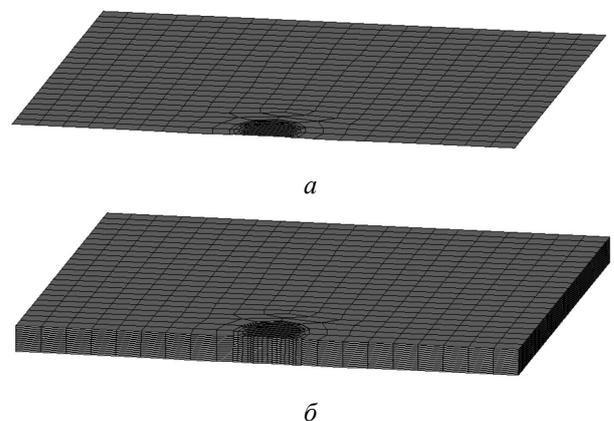


Рис. 3. Конечно-элементная сетка пластины при использовании 2D-модели (а) и 3D-модели (б)

точках эллиптического дефекта для рассматриваемых случаев нагружения приведены в табл. 1. Картины распределения полей деформаций ϵ_x и ϵ_y на поверхности первого слоя

в окрестности дефекта в задаче о растяжении представлены на рис. 4 и 5 (на рисунках отключено отображение материала пластины непосредственно над и под дефектом).

Таблица 1

Результаты расчетов для модельных задач

Вар.	Вид нагружения	Отношение полуосей a/b	Расчетная модель			
			3D-модель		2D-модель	
			ϵ_y^A	ϵ_x^B	ϵ_y^A	ϵ_x^B
1	Растяжение	1,5	-0,0028	0,0069	-0,0029	0,0071
2		1,0	-0,0028	0,0069	-0,0029	0,0071
3	Изгиб	1,5	0,0077	-0,017	0,0079	-0,019
4		1,0	0,0076	-0,016	0,0078	-0,018

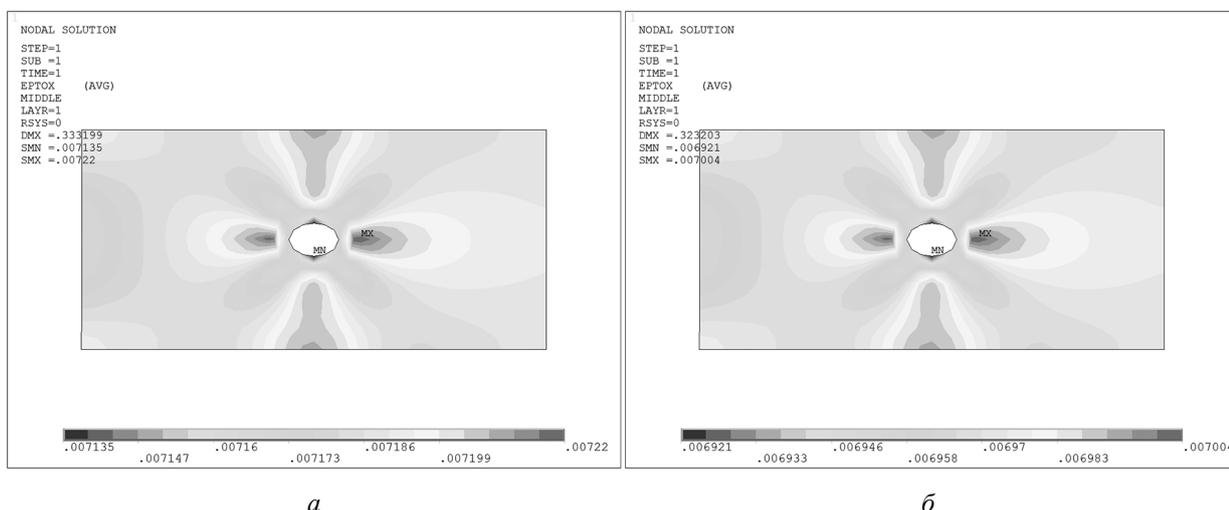


Рис. 4. Картина распределения деформации ϵ_x в 2D-модели (а) и 3D-модели (б) для эллиптического дефекта ($a/b = 1,5$) при растяжении

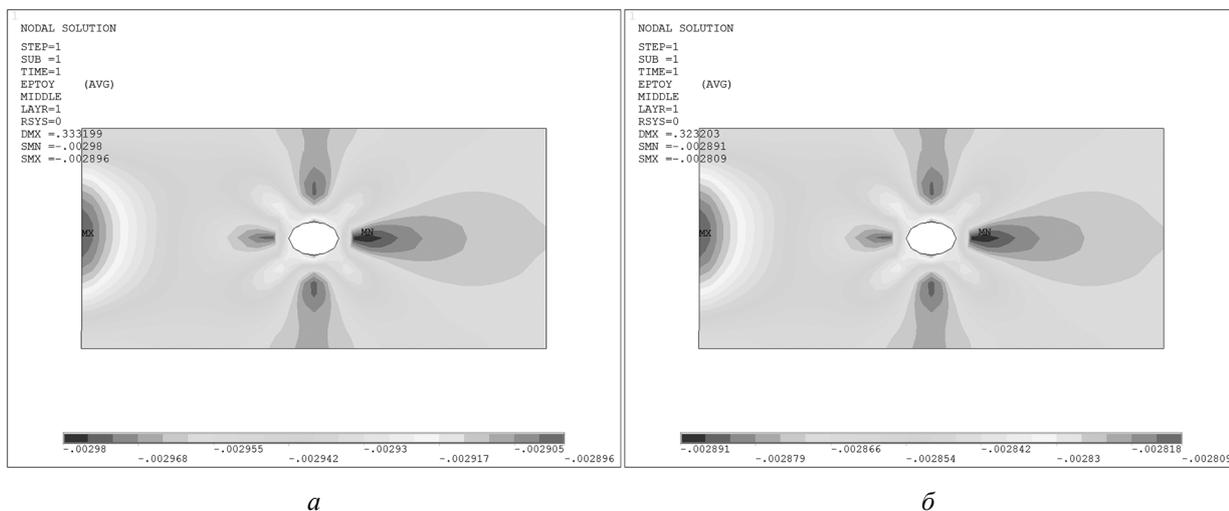


Рис. 5. Картина распределения деформации ϵ_y в 2D-модели (а) и 3D-модели (б) для эллиптического дефекта ($a/b = 1,5$) при растяжении

Анализ полученных распределений деформаций показывает, что различие результатов, получаемых при применении рассмотренных двух способов моделирования – трех- и двухмерного, пренебрежимо мало, а характер полей распределения деформаций идентичен для обеих задач. При этом временные затраты на основе предложенной методики почти на порядок меньше: около 10 с – при использовании 2D-модели и 90 с – при использовании 3D-модели. Заметим, что при увеличении количества слоев КМ вычислительные затраты при использовании предложенной методики будут неизменными, тогда как при применении 3D-модели будут увеличиваться.

Заключение

В работе рассмотрены методический подход и расчетный алгоритм для исследования НДС в композитных конструкциях с дефектами типа расслоения на основе двухмерного конечно-элементного моделирования. Такой подход ориентирован на создание концепции моделирования трещиноподобных дефектов, которые могут быть «встроены» в моделируемую с помощью МКЭ композитную конструкцию без использования 3D-элементов. Это позволяет многократно уменьшить вычислительные затраты при расчете НДС композитной конструкции при сохранении достаточной точности результатов, необходимых для оценки работоспособности соответствующих элементов конструкции.

Результаты решения рассмотренных модельных задач, а также имеющийся опыт расчетов ряда практических задач показали высокую эффективность использования данного подхода для оценки влияния дефекта на НДС конструкции и дальнейшего использования в рамках системы мониторинга их состояния. Следует отметить, что существенно неоднородное и, вместе с тем, весьма характерное распределение деформаций в зоне дефекта позволяет говорить о потенциальной возможности обнаружения и расчета параметров дефекта типа расслоения по величинам деформаций, регистрируемых современными экспериментальными методами.

Список литературы

1. Чернышев С.Л. Новый этап применения композиционных материалов в авиационной // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 1. С. 3–10.
2. Матвиенко Ю.Г. Тенденции нелинейной механики разрушения в проблемах машиностроения. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. – 56 с.
3. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Экспериментально-расчетный метод оценки нагруженности натурных конструкций с поверхностными трещинами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 3. С. 35–42.
4. Чернятин А.С., Разумовский И.А. Комплексный анализ элементов конструкций с поверхностными трещинами // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 1. С. 66–76.
5. Chernyatin A.S., 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. Vol. 45. Iss. 4. P. 506–511.
6. Sutton M.A., J.-J. Orteu, Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Univ. of South Carolina USA. 2009. – 364 p.
7. Razumovsky I.A. Interference-optical Methods of Solid Mechanics / Series: Springer, 2011. – 270 p.
8. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах / Е.Н. Каблов, Д.В. Сиваков, И.Н. Гуляев, К.В. Сорокин, М.Ю. Федотов, Е.М. Дианов, С.А. Васильев, О.И. Медведков // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. № 3. С 10–15.
9. High-Strain Fiber Bragg Gratings for Structural Fatigue Testing of Military Aircraft / C. Davis, S. Tejedor, I. Grabovac, J. Korczyk and T. Ravis // Photonic Sensors. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 215–224.
10. Di Sante R. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications // Sensors. 2015. No. 15. P. 18666–18713.
11. Полилов А.Н. Экспериментальная механика композитов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. – 375 с.
12. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1983. – 296 с.
13. Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн. (Handbook of composites)

- Справочное издание: под ред. Дж. Любина, Б.Э. Геллера. М.: Машиностроение, 1988. – 896 с.
14. Qiu Y., Crisfield M.A., Alfano G. An interface element formulation for the simulation of delamination with buckling // *Engineering Fracture Mechanics*. 2008. Vol. 68. P. 1755–1776.
 15. Wagner W., Balzani C. Simulation of delamination in stringer stiffened fiber-reinforced composite shells // *Computers & Structures*. 2008. Vol. 86. P. 930–939.
 16. Чернякин С.А., Скворцов Ю.В. Анализ роста расслоений в композитных конструкциях // *Вестник СибГАУ*. 2014. №4(56). С. 249–255.
 17. Samanhoand P., Davila C. Mixed-Mode Decohesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Materials / *Proceedings from 42nd AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Seattle, Washington. June 2002. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020053651.pdf> (дата обращения: 13.09.2017).
 18. Корнев В.М., Астапов Н.С. Модель разрушения кусочно-однородной среды при расслоении упругопластических структурированных материалов // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2010. Т. 16. № 3. С. 347–360.
 19. Межслоевая трещиностойкость конструкционных полимерных композиционных материалов / В.Д. Крылов, Н.О. Яковлев, Ю.А. Курганова, О.А. Лашов // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2016. № 1. С. 79–85.
 20. Новиков Г.В., Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В. Метод когезионной зоны в оценке межслоевой трещиностойкости слоистых композитов // *XLII Гагаринские чтения*. 2016. Т. 3. С. 481–482.
 21. Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В., Новиков Г.В. Сочетание подходов механики трещин и метода конечных элементов для оценки и прогнозирования квазистатической межслоевой трещиностойкости слоистых полимерных композиционных материалов и клеевых соединений // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. 2016. Т. 1. С. 107–112.
 22. Stress and Free Edge Delamination Analyses of Delaminated Composite Structure Using ANSYS / *Dasa Subhankar et al.* // *HYPERLINK* <<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=46360>> \o «Procedia Engineering» *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 64. P. 1364–1373.
 23. Mohammed Waseem H.S., Kiran Kumar N. Finite element modeling for delamination analysis of double cantilever beam specimen // *SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME)*. 2014. Vol. 1. Iss. 5. P. 27–33.
 24. Морозов Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
 25. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
 26. Полилов А.Н., Татусь Н.А., Плитов И.С. Оценка влияния разориентации волокон на жесткость и прочность профилированных композитных элементов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2013. № 5. С. 58–67.
 27. Северов П.Б., Думанский А.М. Экспериментальное исследование механического поведения слоистых углепластиков при статическом и циклическом нагружении // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2014. № 5. С. 93–97.

Материал поступил в редакцию 06.07.2017

**УРНЕВ
Александр Сергеевич**

E-mail: Urnev-AS@yandex.ru
Тел.: (905) 597-90-92

Младший научный сотрудник, аспирант Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов: численные методы механики разрушения, прочность и трещиностойкость элементов конструкций из композитных материалов. Автор 5 научных публикаций.

**ЧЕРНЯТИН
Александр Сергеевич**

E-mail: cas@inbox.ru
Тел.: (905) 757-65-40

Кандидат технических наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов: численные и экспериментально-расчетные методы анализа напряженно-деформированного состояния, обратные задачи механики деформируемого твердого тела, механика разрушения. Автор более 25 публикаций в отечественных и зарубежных научных изданиях.

**МАТВИЕНКО
Юрий Григорьевич**

E-mail: matvienko7@yahoo.com
Тел.: (499) 135-12-04

Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом «Прочность, живучесть и безопасность машин» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов: нелинейное физико-математическое моделирование и иерархическая система критериев повреждений и разрушения материалов и конструкций на различных масштабно-структурных уровнях; комплексные критерии; методы анализа и нормирования прочности, живучести, безопасности и ресурса машин и конструкций в сильно поврежденных состояниях в условиях экстремальных физико-механических воздействий и коррозионных сред. Автор более 230 научных публикаций, из них 14 монографий и 10 авторских свидетельств на изобретения.

**РАЗУМОВСКИЙ
Игорь Александрович**

E-mail: murza45@gmail.com
Тел.: (499) 135-62-98

Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией механики разрушения и живучести Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов: экспериментальные и экспериментально-расчетные методы исследования напряженно деформированного состояния с использованием оптико-интерференционных методов; механика разрушения, методы анализа полей остаточных напряжений; прочность и трещиностойкость многослойных конструкций. Автор более 130 научных публикаций в отечественных и международных изданиях, в том числе 7 коллективных и 2 личных монографий.