

УДК 678.8

*Л.А. Кашарина¹, В.В. Махсидов¹, О.И. Смирнов¹, И.А. Рузаков¹***ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В ПКМ ПО ОТКЛИКУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ (обзор). Часть I**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-97-104

Рассматриваются методы обнаружения и дифференцирования типа дефектов в полимерных композиционных материалах с помощью встроенных оптоволоконных датчиков с применением прямой оптоволоконной интеррогации и способа сканирования материала волнами Лэмба. Рассмотрены виды и стадии возникновения дефектов, объединяющиеся по различным классификационным признакам. Описаны специфические особенности формы откликов от оптоволоконных датчиков, позволяющие проводить идентификацию типа дефектов, формирующихся в полимерных композиционных материалах при различных внешних воздействиях.

Ключевые слова: *идентификация дефектов, мониторинг конструкций, полимерные композиционные материалы, оптоволоконная брэгговская решетка, деформация, трещина, расслоение.*

*L.A. Kasharina¹, V.V. Makhsidov¹, O.I. Smirnov¹, I.A. Ruzakov¹***IDENTIFICATION OF DEFECTS IN POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS BY FIBER BRAGG GRATING RESPONSE (review). Part I**

The paper discusses methods for detecting and differentiating the type of defects in polymer composite materials using embedded fiber-optic sensors using direct fiber-optic interrogation and the method of scanning material by Lamb waves. The types and stages of the occurrence of defects, combined according to various classification criteria, are considered. Specific features of the response form from fiber-optic sensors are described, which allow identification of the type of defects that form in polymer composite materials under various external influences.

Keywords: *identifying of defects, monitoring of structures, polymeric composite materials, fiber-optic Bragg grating, deformation, crack, delamination.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В вопросах о возможности обнаружения и идентификации дефектов в полимерных композиционных материалах (ПКМ), регистрируемых различными методами, предпочтение отдается неразрушающим методам контроля. Несмотря на некоторые недостатки неразрушающих методов контроля, например, такие как невозможность точно визуализировать профиль внутренней поверхности разрушения, анализируя который технические специалисты получают информацию о причине и механизмах разрушения материала. В то же время важность сохранения относительной целостности материала и конструкции остается приоритетной задачей для дальнейшего подробного исследования

и использования результатов таких исследований для корректировки инструкций и программ технического осмотра, проектирования, проведения испытаний и эксплуатации ответственных изделий в авиационной и ракетно-космической отрасли. Получение таких знаний не менее (если не более) важно с учетом роста объемов применения ПКМ для изготовления конструкций летательных аппаратов различного назначения [1–3]. При этом предпочтительными являются методы неразрушающего и встроенного контроля материалов и конструкций из ПКМ в ходе технологического процесса изготовления, испытаний и эксплуатации образцов и конструкций из ПКМ [4–7].

В настоящее время обнаружение повреждений и дефектов в ПКМ является неотъемлемой составляющей при построении бортовых систем мониторинга, разновидности которых называются также системами мониторинга состояния и нагруженности (system of health monitoring (SHM), health and usage monitoring system (HUMS), integrated vehicle health management (IVHM) и др.) [8, 9]. Необходимость практического внедрения таких систем связана с важностью оценки фактической нагруженности, как правило сильно отличающейся от планируемой, при определении ресурса летательного аппарата. Такая мера оправдана технически и экономически, так как позволит своевременно получать данные о степени поврежденности конструкции, оптимизировать проведение технических осмотров контролируемых объектов и, вследствие этого, сократить время простоя летательного аппарата для проведения технического осмотра или ремонта. Так, в работе [8], при описании необходимых мероприятий по созданию конкурентоспособной бортовой системы мониторинга, авторы указывают на важность разработки методов интерпретации данных, полученных различными методами обнаружения повреждений. Необходимо отметить, что работы по интерпретации повреждений и идентификации дефектов ведутся в различных лабораториях России и мира, результаты которых анализируются и кратко обсуждаются в данном обзоре.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 4.1. «Интеллектуальные ПКМ II и III поколений» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [2].

Способы идентификации дефектов в полимерных композиционных материалах по сигналу оптоволоконных датчиков

Виды и стадии возникновения дефектов

Одной из важных стадий при идентификации обнаруженных дефектов в ПКМ является их классификация и разделение на группы, что позволяет составить наиболее полную картину разновидностей дефектов и применить к группам общие подходы анализа, предотвращения, контроля развития и ремонта обнаруженных повреждений.

Так, для разделения на группы наиболее часто применяются следующие классификационные признаки:

- по причине возникновения дефекта;
- по развитию дефекта.

Приведенные признаки способствуют разделению дефектов в зависимости от решаемой задачи и, как правило, описывают один и тот же дефект с точки зрения возможности предотвращения, оценки разрушающего эффекта, ремонта и др. (рис. 1).

Так, дефекты, появляющиеся в процессе ручного и автоматизированного способов интеграции волокна и выкладки препрега, представляют собой щели (gaps), формирующиеся при отсутствии адгезии между препрегом и оптическим волокном, содержащим брэгговскую решетку, в результате разнотолщинности направляющей ленты и наложения (overlaps), формирующиеся при неравномерности поверхностной плотности

препрега [10–12]. Устранив указанные недостатки при изготовлении препрега и укладке оптоволокна, можно исключить возникновение таких дефектов. Причем указанные причины появления щелей и наслоений наиболее выражено проявляются при автоматизированной выкладке препрега.



Рис. 1. Классификация дефектов в ПКМ

К дефектам, появляющимся в ходе испытаний и эксплуатации конструкций, относятся трещины, расслоения, разрыв волокон, низко- и высокоэнергетичные удары, локальный высокоэнергетичный нагрев и др., которые, в свою очередь, делятся на усталостные и ударные.

В то же время по различию механизмов разрушения и появления дефектов выделяются усталостные, ударные и предопределенные технологическим процессом (не всегда полностью устранимые – например, применяемое оптоволокно диаметром 125 мкм по сравнению с оптоволокном диаметром 52 или 40 мкм) виды повреждений ПКМ.

Механизм появления усталостных дефектов описывается несколькими стадиями, которые кратко можно охарактеризовать как формирование микротрещин в матрице и появление микроразрывов волокон, далее происходит укрупнение и слияние микротрещин, ухудшение адгезии на границе «волокно–матрица», приводящее к расслоениям, а также рост этих расслоений и наступает разрушение материала. В работе [13] описан более сокращенный механизм появления дефектов, включающий всего три стадии: снижение внутренней прочности, приблизительное линейное уменьшение (approximately linear reduction) и полное разрушение материала.

Более подробное рассмотрение низко- и высокоэнергетичных ударных дефектов будет приведено во второй части обзора.

Идентификация дефектов в ПКМ по анализу сигналов от ВБР при оптической интеррогации

Для мониторинга конструкций из ПКМ методами встроенного контроля применяются датчики, создаваемые в объеме оптического волокна путем записи периодической структуры, позволяющей сформировать волоконную брэгговскую решетку (ВБР). В процессе нагружения происходит растяжение или сжатие ВБР, приводящее соответственно

к увеличению или уменьшению периода решетки сформированной ВБР. Такие изменения в периоде ВБР позволяют проводить идентификацию повреждений в ПКМ.

Так, простое приложение нагрузки, не превышающей порога разрушения ПКМ и не совпадающей по направлению с осью ВБР, приводит к значительному уширению пика в спектре отклика датчика [14]. В то же время идентифицировать тип дефекта материала по анализу только уширения и расчету полуширины на полувысоте пика однозначно невозможно, но оценить направление действующей нагрузки уже представляется возможным. Так, нагрузка, направление которой совпадает с основной осью ВБР, приведет преимущественно к сдвигу пика без значительного уширения. Тогда как действие нагрузки, направленной перпендикулярно или под каким-либо другим углом к основной оси ВБР, послужит причиной более значительного уширения пика. Поэтому остается открытым вопрос о том, какие виды дефектов в ПКМ преимущественно образуются при нагружении материала при соосном и поперечном внешнем воздействии, а также при воздействии под различными углами. Необходимо также отметить, что при анализе признаков отклика можно получать информацию о направлении действия нагружающего усилия.

В работе [15] показано, что различные стадии процесса нагружения образца ПКМ приводят к изменению в форме пика и продольно действующая нагрузка (соосная ВБР) вызывает только сдвиг пика, а при дальнейшем увеличении нагрузки, когда при растяжении образец утоняется, по закону баланса сил начинает действовать и поперечно действующая нагрузка, которая, в свою очередь, приводит к увеличению ширины пика и его раздвоению. Далее, когда концентрация напряжений в материале возрастает настолько, что приводит к неравномерному распределению действующей нагрузки, изменяется равномерность растяжения ВБР. В результате изначальная строгость периодичности ВБР ухудшается и решетка начинает работать по принципу чипированной (аперидической) брэгговской решетки.

Таким образом, по постепенному сдвигу и уширению пика в спектре отклика ВБР можно делать вывод о том, как концентрация напряжений в ПКМ, изменяющаяся с ростом прикладываемой нагрузки, влияет на прочность и перераспределение приложенного усилия в материале.

Появление различного вида щелей (gaps), наслоений (overlaps), трещин и расслоений, особенно при автоматической выкладке препрега, приводит к значительному изменению формы и положения пика в спектре отклика ВБР (рис. 2). Причем такие изменения можно видеть на уровне каждого слоя ПКМ. При появлении трещин и расслоений происходит уширение и расщепление пика в спектре, а соответствующее изменение величины полуширины на полувысоте определяет количественные характеристики повреждений, такие как длина или расстояние между границами дефекта [12, 16–21]. При полном расслоении пик в спектре, проходя через стадию простого сдвига и уширения, возвращается в положение, соответствующее простому нагружению, направленному соосно основной оси ВБР [18], что, вероятно, связано с некоторой релаксацией напряжений в ПКМ после полного отделения слоя.

Рассмотрение поведения материала во время действия нагрузки с позиции возможности релаксации напряжений в ПКМ после полного отделения слоя или нескольких слоев свидетельствует о необходимости наблюдения за формой отклика в динамическом режиме и желательно при повышенной частоте записи отклика.

В работе [22] приведены результаты исследования изменения формы пика от приложенной нагрузки при неравномерном профиле нагружения. Таким образом, запись и анализ в динамическом режиме пиков в спектре отклика ВБР позволят контролировать процесс нагружения конструкции из ПКМ и проводить корректировку

профиля нагружения конструкции для выполнения требований по «безопасному ресурсу» при эксплуатации или требований по «допустимому ресурсу» [8].

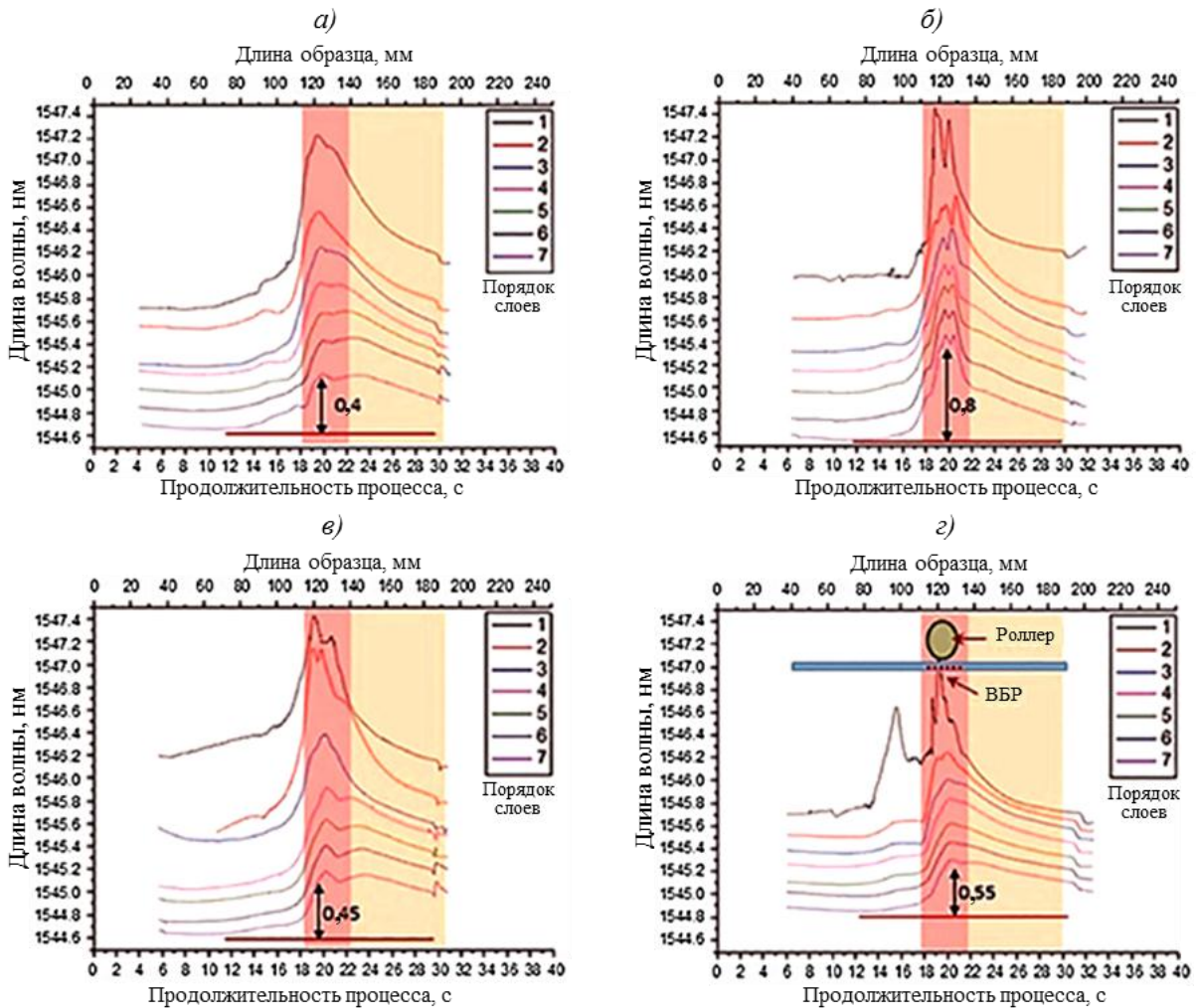


Рис. 2. Спектры образцов:

а – наслоение стекла с нейлоном; *б* – наслоение с алюминием; *в* – щель; *г* – образец сравнения [12]

Особое место в идентификации повреждений и направления действия нагрузки занимают так называемые мультипараметрические (двулучепреломляющие) датчики ВБР, отличие которых заключается в том, что вокруг сердцевины волокна создается оболочка специфической формы: эллиптической, в форме «галстук-бабочка» (bow-tie), «панда» (panda). Такие датчики позволяют определять направление приложенного нагружения по форме отклика, а также проводить качественную и количественную оценку приложенных воздействий [23, 24].

Исследование, направленное на количественное определение параметров повреждений, проводимое авторами работы [25], включает теоретический расчет зависимости характера распределения приложенного воздействия на размеры расслоений. Результаты проведенных работ указывают на значительные изменения формы пика в спектре, которые выражаются в расщеплении одного пика на три составляющие. Чем выше степень расщепления пика, тем больше наблюдаемое расслоение в ПКМ.

Идентификация дефектов в ПКМ по анализу сигналов от ВБР при зондировании конструкции волнами Лэмба и акустическим методом

Одним из способов идентификации повреждений и определения направления приложенного внешнего воздействия является метод сканирования конструкции из ПКМ волнами Лэмба ультразвуковой частоты. Применение волн Лэмба для идентификации дефектов особенно актуально при необходимости провести контроль конструкции большого размера, так как данные волны характеризуются низким коэффициентом затухания. Применение метода сканирования ПКМ волнами Лэмба также показывает свою эффективность при одновременном действии нагрузок, приложенных в различных направлениях. Но наряду с таким значимым преимуществом волны Лэмба имеют и недостаток, усложняющий обнаружение дефекта, – волны описываются двумя модами (асимметричной и симметричной), распространение которых зависит от ряда параметров – частоты колебаний, толщины пластины и др. [26].

Для преодоления указанного недостатка авторы работы [27] применяли специальным образом микроструктурированное оптическое волокно с брэгговской решеткой (MOFBG), позволяющее разделить отклик от асимметричной и симметричной мод волн Лэмба (рис. 3, а). Сердцевина такого оптоволокна структурирована в виде «крыльев бабочки», а формируемый отклик в виде спектра из двух пиков позволяет определить направление действующего внешнего воздействия. Так, на рис. 3, б показано, что при воздействии нагрузки, соосной оси ВБР, происходит равномерный сдвиг пиков в спектре в одну сторону (в сторону больших или малых длин волн – в соответствии с растяжением/сжатием конструкции из ПКМ), а воздействие нагрузки, поперечной оси ВБР, приводит к сдвигу пиков в спектре в противоположные стороны (в сторону сближения/удаления пиков – в соответствии с растяжением/сжатием конструкции из ПКМ) [27].

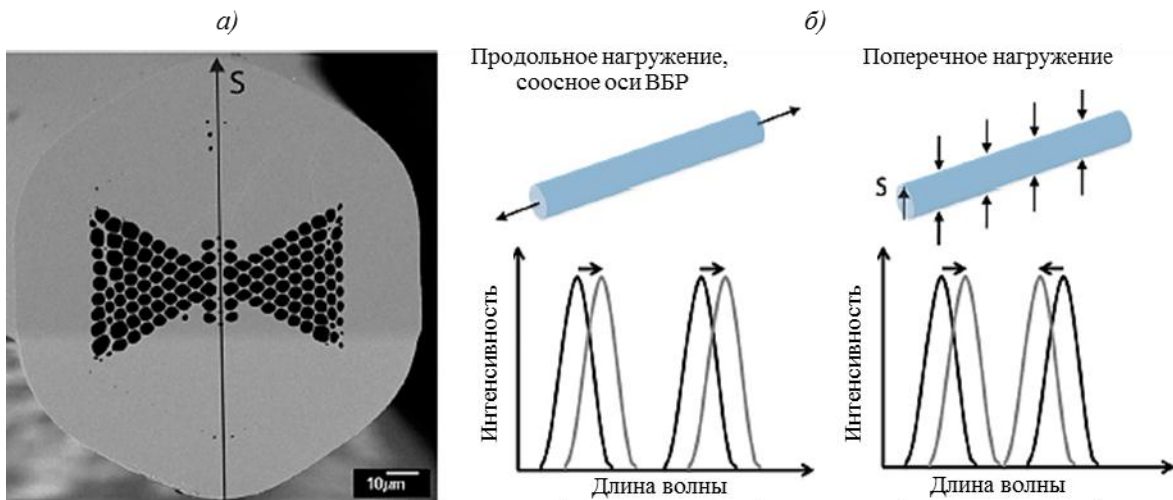


Рис. 3. Данные сканирующей электронной микроскопии поперечного среза сенсора MOFBG (а) и вид откликов сенсора MOFBG при соосном и поперечном направлении приложенной внешней нагрузки (б) [27]

Как правило, для более отчетливого разделения асимметричной и симметричной мод волн Лэмба интеграцию ВБР проводят таким образом, чтобы оси ВБР и источника распространения волн Лэмба (актюатора) располагались под углом друг к другу [28].

Наиболее ярко выраженным дефектом, идентифицируемым методом сканирования волнами Лэмба, является ухудшение и отсутствие адгезии. Так, в работе [29] показано, что с ухудшением адгезии одна из мод волн Лэмба сильно уменьшается по интенсивности и одновременно между первоначальными появляется еще одна мода, которая имеет большую скорость изменения.

Таким образом, метод сканирования волнами Лэмба с чувствительными элементами на основе ВБР позволяет идентифицировать уменьшение адгезии и процесс начала расслоения в ПКМ.

Обсуждение и заключения

Анализ методов идентификации дефектов и повреждений в ПКМ для выбора оптимального метода или их комбинации для изучения причин, характера и развития повреждений ПКМ используется для накопления экспериментальных статистических знаний о состоянии конструкции из ПКМ. В свою очередь, применение таких данных при проектировании, испытании и эксплуатации конструкций позволит реализовать новые подходы к эксплуатации воздушных судов, строительных конструкций и разрабатывать для этих целей техническую и эксплуатационную документацию. Современные достижения и уровень технологий изготовления оптоволоконных датчиков позволяют разрабатывать и применять системы встроенного контроля конструкций из ПКМ и не только обнаружить дефект, но оценить его тип и размер.

Анализ отечественной и зарубежной научной литературы позволяет также сделать вывод о возможности регистрации неоднородно распространяющейся нагрузки с помощью ВБР как при оптической интеррогации, так и при сканировании волнами Лэмба ультразвуковой частоты.

Рассмотренные возможности идентификации дефектов в ПКМ на данном этапе развития имеют свои недостатки и достоинства, поэтому для более полного описания дефекта целесообразно применение комбинации нескольких методов, уже рассмотренных в данной работе, а некоторые из них будут обсуждаться во второй части.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. №5–6. С. 40–44.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. №3. С. 97–105.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Шелемба И.С. Волоконно-оптические датчики для мониторинга коррозионных процессов в узлах авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (48). С. 26–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-26-34.
5. Сорокин К.В., Мурашов В.В. Мировые тенденции развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. №3 (36). С. 90–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-90-94.
6. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. и др. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. №3. С. 10–15.
7. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
8. Свирский Ю.А., Трунин Ю.П., Панков А.В. и др. Бортовые системы мониторинга (БСМ) и перспективы применения в них волоконно-оптических датчиков // Композиты и наноструктуры. 2017. №1. Т. 9. С. 35–44.
9. Фирсов Л.Л., Юргенсон С.А. Принципы построения системы мониторинга технического состояния конструкции для авиационных конструкций // Прикладная фотоника. 2017. №4. Т. 4. С. 279–295.

10. Fayazbakhsh K., Nik M.A., Pasini D., Lessard L. Defect layer method to capture effect of gaps and overlaps in variable stiffness laminates made by Automated Fiber Placement // *Composite Structures*. 2013. Vol. 97. P. 245–251.
11. Oromiehie E., Prusty B.G., Rajan G., Compston P. Optical fiber Bragg grating sensors for process monitoring in advanced composites // *2016 IEEE Sensors Applications Symposium*. 2016. P. 222–226.
12. Oromiehie E., Prusty B.G., Rajan G., Compston P. Characterization of process-induced defects in automated fiber placement manufacturing of composites using fiber Bragg grating sensors // *Structural health monitoring*. URL: <http://sagepub.cj.uk/journalsPermissions.nav> (дата обращения: 12.02.2019). DOI: 10.1177/1475921716685935.
13. Guo Z., Feng J., Wang H. et al. Fiber Bragg Grating Sensors for Fatigue Monitoring of Composite // *Polymers and Polymer Composites*. 2013. Vol. 21. No. 9. P. 553–560.
14. Pereira G.F., Mikkelsen L.P., McGugan M. Crack Detection in Fibre Reinforced Plastic Structures Using Embedded Fibre Bragg Grating Sensors: Theory, Model Development and Experimental Validation // *PLoS ONE*. 2015. Vol. 10 (10). P. 35–36. DOI: 10.1371/journal.pone.0141495.
15. Okabe Y., Yashiro S., Kosaka T., Takeda N. Detection of transverse crack in CFRP Composites using embedded fiber bragg grating sensors // *Smart Materials Structure*. 2000. No. 9. P. 832–838.
16. Takeda N., Minakuchi S. Recent development of structural health monitoring technologies for aircraft composite structures in japan // *Smart Materials Structure*. 2003. No. 6. P. 456–467.
17. Rajabzadeh A., Hendriks R., Heusdens R., Groves R. Classification of composite damage from FBG load monitoring signals // *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems*. 2017. Vol. 10168. P. 1016831-1–1016831-8.
18. Pereira G., Mikkelsen L., McGugan M. Crack Growth Monitoring by Embedded Optical Fibre Bragg Grating Sensors Fibre Reinforced Plastic Crack Growing Detection // *Proceedings of the 3rd International Conference on Photonics, Optic sand Laser Technology (OSENS-2015)*. 2015. P. 133–139.
19. Pereira G.F., Mikkelsen L.P., McGugan M. Crack growth monitoring in composite materials using embedded optical Fiber Bragg Grating sensor // *Proceedings of the 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering (SMN) in Conjunction with the International Conference on Smart Materials and Structures (Cansmart-2015)*. 2015. P. 156–165.
20. Kahandawa G.C., Epaarachchi J., Wang H., Lau K.T. Use of FBG Sensors for SHM in Aerospace Structures // *Photonic Sensors*. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 203–214.
21. Будадин О.Н., Кульков А.А., Кутюрин В.Ю. Волоконно-оптические датчики с решетками Брэгга для мониторинга напряженно-деформированного состояния изделий из композиционных материалов // *Контроль и испытания конструкций*. 2018. №2. С. 60–67.
22. Takeda S., Yamamoto T., Okabe Y., Takeda N. Debonding monitoring of composite repair patches using embedded small-diameter FBG sensors // *Smart materials structure*. 2007. No. 16. P. 763–770.
23. Udd E. Review of multi-parameter fiber grating sensors. // *Fiber Optic Sensors and Applications V*. 2007. Vol. 6770. P. 677002-1–677002-10. DOI: 10.1117/12.753525.
24. Lawrence C.M., Nelson D.V., Udd E., Bennet T. A fiber optic sensor for transverse strain measurement // *Experimental mechanics*. 1999. Vol. 39. No. 3. P. 202–209.
25. Matveenko V., Serovaev G., Takshkinov M. Numerical analysis of delamination in composite structures using strain measurements from fiber bragg gratings sensors // *2nd International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics (ICTAEM 2018)*. 2019. SI 5. P. 62–67. DOI: 10.1007/978-3-319-91989-8_11.
26. Мурашов В.В. Контроль многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2011. №10. С. 4–19.
27. De Pauw B., Goossens S., Geernaert T. et al. Fibre Bragg Gratings in Embedded Microstructured Optical Fibres Allow Distinguishing between Symmetric and Anti-Symmetric Lamb Waves in Carbon Fibre Reinforced Composites // *Sensors*. 2017. Vol. 17. URL: <http://mdpi.com/journal/sensors> (дата обращения: 12.02.2019). DOI: 10.3390/s17091948.
28. Yu F., Wu Q., Okabe Y. et al. Identification of Damage Types in Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates by a Novel Optical Fiber Acoustic Emission Sensor // *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*. 2014. P. 1186–1193.
29. Takeda N., Okabe Y., Mizutani T. Damage detection in composites using optical fibre sensors // *Proceedings IMechE*. 2007. Vol. 221. Part G: J. Aerospace Engineering. P. 497–508.