

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2024 г. Р.В. Ромашко^{1,*}, О.В. Башков^{1,2,**}, Т.А. Ефимов^{1,***}, М.Н. Безрук^{1,****},
Д.А. Бобруйко^{1,*****}, Н.В. Макарова^{1,*****}

¹Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН,

Россия 690041 Владивосток, ул. Радио, 5

²Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Россия 681013 Комсомольск-на-Амуре, просп. Ленина, 27

E-mail: *romashko@iacp.dvo.ru; **bashkov@knastu.ru; ***efimov@iacp.dvo.ru; ****bezmisha@iacp.dvo.ru;
*****bobruyko@iacp.dvo.ru; *****makarova@iacp.dvo.ru

Поступила в редакцию 07.12.2023; после доработки 08.12.2023

Принята к публикации 08.12.2023

Представлены результаты экспериментального исследования работы волоконно-оптических датчиков (ВОД) акустической эмиссии, внедряемых в структуру полимерных композиционных материалов (ПКМ). Проведена оценка надежности и отказоустойчивости ВОД при критических механических нагрузках на ПКМ, а также исследовано влияние наличия ВОД, внедренного в структуру ПКМ, на механические характеристики материала. Для демодуляции сигналов ВОД акустической эмиссии использованы принципы адаптивной голографической интерферометрии, базирующейся на двухволновом взаимодействии на динамической голограмме, формируемой в фоторефрактивном кристалле.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, неразрушающий контроль, акустическая эмиссия, оптоволоконный датчик, адаптивный интерферометр.

FEATURES OF APPLICATION OF ADAPTIVE INTERFEROMETRIC FIBER SENSORS OF ACOUSTIC EMISSION TO MONITOR THE CONDITION OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

R.V. Romashko^{1,*}, O.V. Bashkov^{1,2,**}, T.A. Efimov^{1,***}, M.N. Bezruk^{1,****}, D.A. Bobruyko^{1,*****},
N.V. Makarova^{1,*****}

¹Institute of Automation and Control Processes FEB RAS,

Russia 690041 Vladivostok, Radio street, 5

²Komsomolsk-na-Amure State University,

Russia 681013 Komsomolsk-na-Amure, Prospekt Lenina, 27

E-mail: *romashko@iacp.dvo.ru; **bashkov@knastu.ru; ***efimov@iacp.dvo.ru;
****bezmisha@iacp.dvo.ru; *****bobruyko@iacp.dvo.ru; *****makarova@iacp.dvo.ru

The results of an experimental study of the operation of fiber optic sensors (FOS) of acoustic emission introduced into the structure of polymer composite materials (PCM) are presented. The reliability and fault tolerance of FOS under critical mechanical loads on PCM was assessed, and the influence of the presence of FOS embedded into the structure of PCM on the mechanical characteristics of the material was investigated. For demodulation of FOS output signals, the principles of adaptive holographic interferometry based on two-wave mixing at dynamic hologram formed in a photorefractive crystal are used.

Keywords: polymer composite material, NDT, acoustic emission, fiber optic sensor, adaptive interferometer.

DOI: 10.31857/S0130308224010023

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) становятся все более востребованными современной промышленностью. Внимание к этим материалам обусловлено тем, что ПКМ удовлетворяют жестким, порой противоречащим друг другу требованиям, таким как обеспечение малого веса конструкций при сохранении максимальной прочности и упругости, а также надежности и долговечности работы конструкций в тяжелых условиях, в том числе при

высоких температурах и в агрессивных средах [1]. Однако при сильных, особенно циклических, механических нагрузках внутренняя структура ПКМ может испытывать необратимые изменения, проявляющиеся в появлении внутри материала пор, трещин, отслоений и других дефектов, что неизбежно влечет собой падение прочностных характеристик материала. С учетом того, что такие изменения могут протекать катастрофически быстро, повышается актуальность разработки экспресс-методов диагностики ПКМ для обеспечения безопасности и надежности их использования.

Одним из перспективных методов диагностики и неразрушающего контроля является метод акустической эмиссии (АЭ), который позволяет обнаруживать и контролировать появление и развитие дефектов и трещин в конструкционных материалах на ранних стадиях. Этот метод использует акустические сигналы, сопровождающие появление внутренних дефектов или структурных изменений материала. За последние годы разработаны множество подходов и алгоритмов анализа данных АЭ для обнаружения и локализации развивающихся дефектов в ПКМ [2—5].

Классические методы регистрации сигналов АЭ базируются на использовании пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) [6]. Высокая чувствительность ПЭП АЭ делает их перспективными для исследования свойств материалов на стадии изготовления или испытания, однако значительный вес, габариты и низкая помехозащищенность ПЭП затрудняют их применение для контроля элементов конструкций непосредственно в процессе эксплуатации последних. Кроме того, значительная экстинкция акустических сигналов в ПКМ обуславливает необходимость использования множества точечных ПЭП для диагностики протяженных элементов и конструкций [7]. В свою очередь, альтернативный подход в построении АЭ систем неразрушающего контроля базируется на основе применения для регистрации сигналов АЭ волоконно-оптических датчиков (ВОД) [8—10]. В отличие от традиционных для АЭ контроля пьезоэлектрических датчиков ВОД имеют ряд преимуществ, таких как малый вес, гибкость, устойчивость к электромагнитным помехам, агрессивным средам и высоким температурам [11]. Кроме того, протяженные ВОД АЭ, обладающие распределенной чувствительностью, способны обеспечить регистрацию акустических сигналов по всей длине укладки датчика на объекте исследования, что в итоге повышает эффективность системы диагностики в целом [12, 13]. При этом сами волоконные световоды, будучи внедренными в ПКМ на стадии его изготовления, могут выполнять не только функцию сенсора, но и армирующего волокна [14, 15], а применение методов адаптивной голографической интерферометрии для детектирования сигналов волоконно-оптических датчиков АЭ [16] открывает перспективы для использования последних в задаче диагностики элементов из ПКМ непосредственно в процессе их эксплуатации.

Вместе с тем механическая нагрузка, под воздействием которой находится ПКМ, может приводить к ухудшению метрологических параметров ВОД, внедренных в структуру композитного материала, и тем самым ограничивать область их применения в задачах неразрушающего контроля. С другой стороны, открытым остается вопрос влияния волоконных световодов, внедряемых в структуру ПКМ, на прочностные свойства последнего. В этой связи в настоящей работе выполнено экспериментальное исследование влияния механических напряжений, возникающих в нагруженном ПКМ, на чувствительность интегрированных в его структуру волоконно-оптических чувствительных сенсоров АЭ. Кроме этого, выполнено исследование влияния плотности укладки ВОД в структуре ПКМ на его механические свойства.

ОБРАЗЦЫ ПКМ И ПРИНЦИП РЕГИСТРАЦИИ АЭ

Образцы ПКМ, использованные в настоящем исследовании, изготавливали методом вакуумной инфузии из стеклоткани марки «СТ-62004», 10 слоев которой пропитывали эпоксивинилэфирной смолой на основе бисфенола А марки «Derakane 411-350». Из полученных таким образом плит ПКМ толщиной 2 мм вырезали полосы шириной 16 мм и длиной 150 мм.

Система регистрации сигналов АЭ в ПКМ основана на использовании волоконно-оптического датчика, чувствительным элементом которого является протяженный кварцевый волоконный световод, интегрированный внутрь композиционного материала на стадии его изготовления. В работе для реализации датчика использовали многомодовый волоконный световод (сердцевина диаметром 62,5 мкм, оболочка — 125 мкм) длиной 1 м, центральную часть которого (15 см) размещали внутри изготавливаемого образца ПКМ вдоль его длинной стороны между 5-м и 6-м слоями стеклоткани.

Оптическая схема системы регистрации АЭ показана на рис. 1. Волны АЭ, генерируемые развивающимися в материале дефектами, распространяясь по образцу ПКМ, воздействуют и на материал волоконного световода, приводя к модуляции фазы проходящего по нему лазерного излучения (длина волны 1064 нм). Далее фазомодулированный объектный световой пучок, полученный

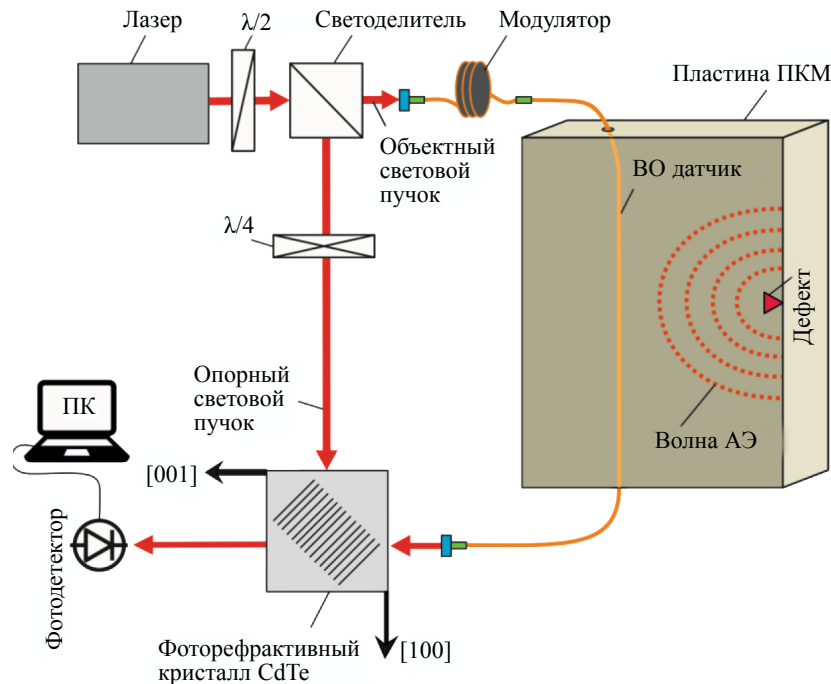


Рис. 1. Оптическая схема системы регистрации АЭ на основе волоконно-оптического датчика и адаптивного голографического интерферометра.

на выходе волоконного световода, направляется в фоторефрактивный кристалл теллурида кадмия (CdTe), где его интерференция с опорным пучком приводит к формированию динамической объемной фоторефрактивной голограммы [17]. В свою очередь, взаимодействие объектной и опорной волн на голограмме приводит к преобразованию модуляции фазы объектного пучка в модуляцию его интенсивности, которая регистрируется фотодетектором. Таким образом, использование волоконно-оптического световода в схеме адаптивного голографического интерферометра позволяет обеспечить регистрацию акустических сигналов, возникающих в ПКМ.

Для демонстрации возможности регистрации волоконно-оптической системой акустических сигналов, в оптический тракт объектного пучка посредством калиброванного пьезоэлектрического модулятора вводилась модуляция фазы световой волны на частоте 50 кГц и амплитудой 0,2 рад, что эквивалентно акустическому давлению 50 мПа. На рис. 2 на вставке «тестовый сигнал» показан зарегистрированный при этом выходной сигнал адаптивного интерферометра, отношение сигнал/шум которого составило 6 дБ, что является приемлемым для проведения измерений.

РАБОТА ВОД В КОМПОЗИТАХ В НАГРУЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Для того, чтобы определить, насколько оптическое волокно и соответственно ВОД АЭ на его основе, будучи внедренным в ПКМ, способно выдерживать механические нагрузки и обеспечивать при этом эффективную регистрацию волн АЭ, проводились следующие экспериментальные исследования. Образец ПКМ подвергался механическому нагружению на изгиб, при этом с помощью ВОД регистрировались сигналы АЭ, генерируемые возникающими внутри ПКМ дефектами. Для контроля изменений метрологических характеристик самого ВОД, интегрированного в образец ПКМ, а также его устойчивости и надежности, использовался вышеописанный подход с внесением дополнительной фазовой тестовой модуляции (50 кГц, 0,2 рад).

Механические испытания образца ПКМ проводились с использованием трехточечного изгиба на универсальной испытательной машине SHIMADZU AG-X plus с максимальным усилием

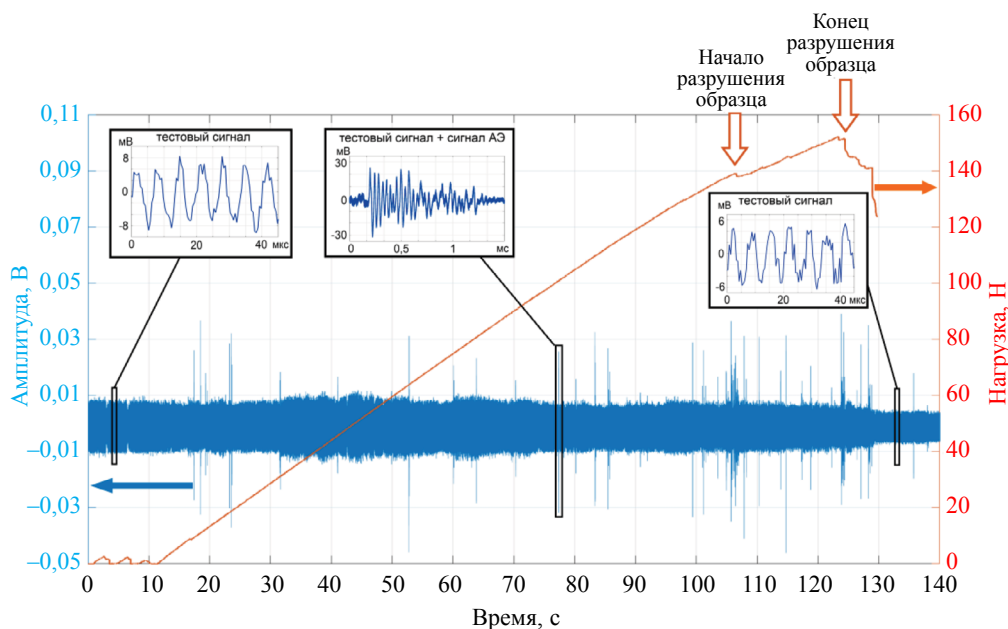


Рис. 2. Динамика изменения сигнала в чувствительном элементе ВОД АЭ, интегрированном в образец ПКМ, в процессе его нагружения в схеме трехточечного изгиба.

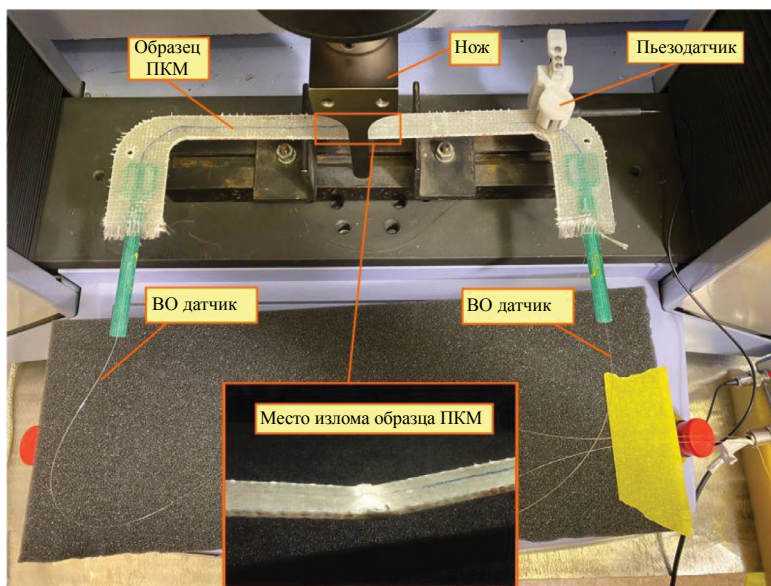


Рис. 3. Образец ПКМ с внедренным в его структуру ВОД в процессе испытания на трехточечный изгиб.

растяжения—сжатия 10 кН (рис. 3). В процессе испытаний образец ПКМ непрерывно нагружался до момента его разрушения (сила нагружения не менее 155 Н). На рис. 2 представлена осциллограмма сигнала, зарегистрированного ВОД в течение всего периода нагружения образца. Как видно из рисунка, нагрузка начала прикладываться к образцу в момент времени 12 с и увеличивалась со скоростью 1,5 Н/с. Начиная с момента времени 17 с, в образце начался процесс образования дефектов, сопровождающихся генерацией сигналов АЭ, регистрируемых ВОД. На вставке рис. 2 «тестовый сигнал + сигнал АЭ» показана развертка типового сигнала, полученного при испытании одного из образцов. Как видно, уровень зарегистрированного сигнала АЭ значительно превышает уровень тестового сигнала при отношении сигнал/шум не хуже 12 дБ. С момента времени 105 с начинается разрушение образца, которое сопровождается повышением

частоты появления единичных событий АЭ, превышающих общий уровень шума. Скорость приращения нагрузки при этом замедляется. В интервале времени 123—130 с происходит разрушение (излом) образца в центральной его части в области приложения изгибающей нагрузки. В связи с тем, что ПКМ имеет волокнистую структуру, полного разрушения образца с разделением на две части не происходит. Разрушенный образец показан на вставке рис. 3. При этом волоконный световод, внедренный в образец, после его разрушения сохранил свою целостность и продолжил функционирование, что подтверждается дальнейшей регистрацией сигналов АЭ. Важно отметить, что флуктуации амплитуды тестового сигнала за весь период измерений не превысили 15 %, что указывает на высокую помехозащищенность ВОД на основе адаптивного голографического интерферометра. Более того, после разрушения образца тестовый сигнал сохранился (см. вставку «тестовый сигнал» в момент времени 133 с), хотя и снизился на 2,4 дБ, что свидетельствует о высокой надежности и отказоустойчивости датчика, способного сохранить работоспособность даже после разрушения образца.

ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ ПКМ С ВНЕДРЕННЫМИ ВОД

Внедренные в структуру композиционного материала волоконные световоды сами могут играть роль технологических дефектов, приводящих к искажению структуры слоев, а также способных вызывать локальную концентрацию напряжений и деформации, что в итоге может негативно сказаться на прочностных характеристиках ПКМ. В процессе изготовления композитных материалов область вокруг оптического волокна может заполняться эпоксидной смолой, создавая «смоляные карманы», которые часто являются местами концентрации напряжений при нагрузках. Таким образом, возникает необходимость исследования влияния интегрированных в структуру ПКМ оптоволоконных чувствительных элементов на его механические свойства.

С этой целью был проведен сравнительный анализ результатов механических испытаний по схеме трехточечного изгиба 16-ти десятислойных образцов ПКМ с различным числом (от 0 до 5) встроенных в их структуру стандартных оптических волокон диаметром 125 мкм, а именно: 3 образца без волокон, 4 образца с одним волокном, 4 образца с двумя волокнами и 5 образцов с пятью волокнами. Эффективная плотность укладки оптических волокон в поперечном сечении ПКМ составила: для образцов с одним волокном — $3,3 \text{ см}^{-2}$, для образцов с двумя волокнами — $6,7 \text{ см}^{-2}$, для образцов с пятью волокнами — $16,7 \text{ см}^{-2}$. Как и в предыдущем эксперименте, оптические волокна были интегрированы между 5 и 6 слоями стеклоткани вдоль длинной стороны образцов.

В испытаниях на статический изгиб к образцам прикладывалась возрастающая нагрузка в диапазоне 0—200 Н вплоть до их разрушения. По результатам испытаний определены экспериментальные значения предела прочности образцов с разным числом внедренных волоконных световодов. Анализ полученных результатов (рис. 4) показал отсутствие, в пределах статистической ошибки, закономерной зависимости предела прочности образца ПКМ, при котором происходит его разрушение, от числа встроенных в структуру ПКМ волоконных световодов.

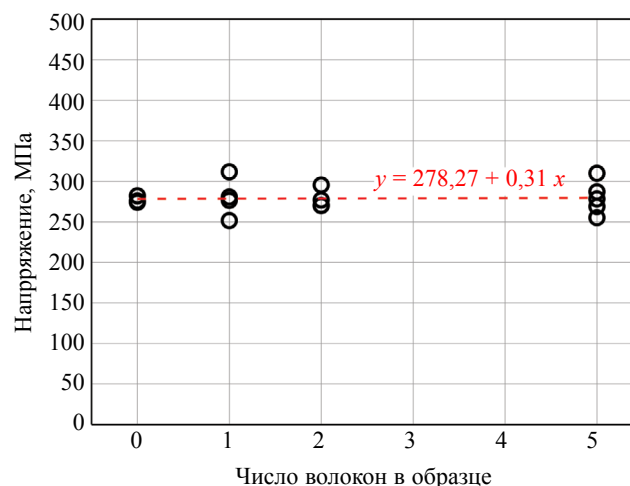


Рис. 4. Диаграмма значений предела прочности образцов ПКМ с разным количеством внедренных волоконных световодов при испытании на изгиб.

Полученные результаты показали, что увеличение плотности укладки в образцах ПКМ волоконных чувствительных элементов не приводит к ухудшению его механических свойств. Возможным фактором, который способствует такому поведению композиционного материала, является использование для его изготовления биаксиальной ткани, обладающей специфической структурой армирования и обеспечивающей наличие достаточного свободного пространства для укладки оптического волокна, что создает условия для его более эффективной интеграции в структуру материала без образования смоляных карманов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе представлены результаты исследований, направленных на разработку и анализ новых подходов к созданию волоконно-оптических распределенных систем регистрации акустической эмиссии. Установлено, что волоконно-оптические датчики, встроенные в структуру ПКМ в процессе изготовления, сохраняют свою работоспособность при приложении к деформируемому материалу механической нагрузки и обеспечивают регистрацию сигналов АЭ от начала возникновения повреждений в композиционном материале и вплоть до его разрушения. Показано, что при одновременном внедрении в структуру ПКМ нескольких плотно размещенных волоконных световодов, материал сохраняет свои механические свойства и изменения предела прочности, определенного по результатам трехточечного изгиба, не происходит.

Полученные результаты могут быть использованы для развития новых систем неразрушающего контроля элементов ответственных инженерных и технических конструкций непосредственно в процессе их эксплуатации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 21-19-00896).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники // Труды ВИАМ. 2020. № 6—7 (89). С. 38—44.
2. Gutkin R., Green C.J., Vangrattanachai S., Pinho S.T., Robinson P., Curtis P.T. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses // Mechanical Systems and Signal Processing. 2011. V. 25(4). P. 1393—1407. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.11.014>
3. Sause M.G.R., Müller T., Horoschenkoff A., Horn S. Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis // Composites Science and Technology. 2012. V. 72(2). P. 167—174. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.10.013>
4. Surgeon M., Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates // NDT & E International. 1999. V. 32(6). P. 311—322. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(98\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(98)00077-2)
5. Sause M.G.R., Schmitt S., Kalafat S. Failure load prediction for fiber-reinforced composites based on acoustic emission // Composites Science and Technology. 2018. V. 164. P. 24—33. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.04.033>
6. Шаранов В.М., Мусиенко М.П., Шаранова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 628 с. (Мир электроники.) ISBN 5-94836-100-4.
7. Серьезнов А.Н., Муравьев В.В., Степанова Л.Н., Паньков А.Ф., Талдыкин С.В., Кожемякин В.Л., Попов С.И. Мультиплицированная многоканальная акустико-эмиссионная система // Дефектоскопия. 1996. № 8. С. 71—76.
8. Bashkov O.V., Romashko R.V., Khon H., Bezruk M.N., Zaikov V.I., Bashkov I.O. Registration of acoustic emission waves in anisotropic composite plates by fiber-optic sensors // Proc. SPIE. 2019. V. 11024. P. 143—147.
9. Sorgente M., Zadeh A.R., Saidoun A. Performance comparison between fiber-optic and piezoelectric acoustic emission sensors // Optics11 white paper. 2020.
10. Chen Rongsheng, Bradshaw Tim, Badcock Rod, Cole Phil, Jarman Paul, Pedder Don, Fernando Gerard. Linear location of acoustic emission using a pair of novel fibre optic sensors // J. Phys.: Conf. Ser. 2005. V. 15. P. 232—236.
11. Bado M.F., Casas J.R. A Review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring // Sensors. 2021. V. 21. Art. No.1818. <https://doi.org/10.3390/s21051818>
12. Verstrynghe E., Lacidogna G., Accornero F., Tomor A. A review on acoustic emission monitoring for damage detection in masonry structures // Construction and Building Materials. 2021. V. 268. P. 121089.
13. Башков О.В., Ромашко Р.В., Зайков В.И., Панин С.В., Безрук М.Н., Кхун Х.Х.А., Башков И.О. Детектирование сигналов акустической эмиссии волоконно-оптическими интерференционными преобразователями // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 18—25.

14. Кошелева Н.А., Сероваев Г.С. Влияние внедренного оптоволокна на внутреннюю структуру полимерного композиционного материала // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2021. № 1. С. 54—63. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2021.1.5>
15. Huang Minghua, Zhou Zhi, Huang Ying, Ou Jinping. A distributed self-sensing FRP anchor rod with built-in optical fiber sensor // Measurement. 2013. V. 46. P. 1363—1370.
16. Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 031101.
17. Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.C. Sensing of multimode-fiber strain by a dynamic photorefractive hologram // Optics Letters. 2007. V. 32. P. 1821—1823.

REFERENCES

1. Kolobkov A.S. Polymer composite materials for various aircraft structures (review) // Proceedings of VIAM. 2020. Issue 6—7 (89). P. 38—44. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44>.
2. Gutkin R., Green C.J., Vangrattanachai S., Pinho S.T., Robinson P., Curtis P.T. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses // Mechanical Systems and Signal Processing. 2011. V. 25 (4). P. 1393—1407. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.11.014>.
3. Sause M.G.R., Müller T., Horoschenkoff A., Horn S. Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis // Composites Science and Technology. 2012. V. 72 (2). P. 167—174. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.10.013>.
4. Surgeon M., Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates // NDT & E International. 1999. V. 32 (6). P. 311—322. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(98\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(98)00077-2).
5. Sause M.G.R., Schmitt S., Kalafat S. Failure load prediction for fiber-reinforced composites based on acoustic emission // Composites Science and Technology. 2018. V. 164. P. 24—33. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.04.033>.
6. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. Piezoelectric sensors. Moscow: TECHNOSPHERA, 2006. 628 p. (Mir elektroniki). ISBN 5-94836-100-4. (in Russian)
7. Seryoznov A.N., Muravyov V.V., Stepanova L.N., Pankova A.F., Taldykin S.V., Kozhemyakin V.L., Popov S.I. Multiplexed multichannel acoustic-emission system // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1996. Is. 8. P. 71—76.
8. Bashkov O.V., Romashko R.V., Khon H., Bezruk M.N., Zaikov V.I., Bashkov I.O. Registration of acoustic emission waves in anisotropic composite plates by fiber-optic sensors // Proc. SPIE. 2019. V. 11024. P. 143—147. <https://doi.org/10.1117/12.2518272>.
9. Sorgente M., Zadeh A.R., Saidoun A. Performance comparison between fiber-optic and piezoelectric acoustic emission sensors // Optics11 white paper. 2020.
10. Chen Rongsheng, Bradshaw Tim, Badcock Rod, Cole Phil, Jarman Paul, Pedder Don, Fernando Gerard. Linear location of acoustic emission using a pair of novel fibre optic sensors // J. Phys.: Conf. Ser. 2005. V. 15. P. 232—236. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/15/1/039>.
11. Bado M.F., Casas J.R. A Review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring // Sensors. 2021. V. 21. Art. No. 1818. <https://doi.org/10.3390/s21051818>
12. Verstrynge E., Lacidogna G., Accornero F., Tomor A. A review on acoustic emission monitoring for damage detection in masonry structures // Construction and Building Materials. 2021. V. 268. P. 121089. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121089>
13. Bashkov O.V., Romashko R.V., Zaikov V.I., Panin S.V., Bezruk M.N., Khun K., Bashkov I.O. Detecting acoustic-emission signals with fiber-optic interference transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. P. 415—421. <https://doi.org/10.1134/S1061830917060031>.
14. Kosheleva N.A., Serovaev G.S. The influence of embedded optical fiber on the internal structure of polymer composite material // Perm Federal Research Centre Journal. 2021. Is. 1. P. 54—63. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2021.1.5>
15. Huang Minghua, Zhou Zhi, Huang Ying, Ou Jinping. A distributed self-sensing FRP anchor rod with built-in optical fiber sensor // Measurement. 2013. V.46. P. 1363—1370. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.12.012>
16. Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 031101. <https://doi.org/10.1063/1.3049475>
17. Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.C. Sensing of multimode-fiber strain by a dynamic photorefractive hologram // Optics Letters. 2007. V. 32. P. 1821—1823. <https://doi.org/10.1364/OL.32.001821>