

УДК 620.179.1:678.8

Л.А. Кашарина<sup>1</sup>, В.В. Махсидов<sup>1</sup>**ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В ПКМ ПО ОТКЛИКУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ (обзор). Часть II**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-43-50

*Рассматриваются методы обнаружения, дифференцирования типа дефектов и их локализации в полимерных композиционных материалах с помощью встроенных оптоволоконных датчиков с применением прямой оптоволоконной интеррогации при повышенной частоте опроса датчиков. Рассмотрены виды и стадии возникновения дефектов и описаны этапы их роста. Приведены специфические особенности формы откликов от оптоволоконных датчиков, позволяющие проводить анализ механизмов формирования и идентификацию типа дефектов, возникающих в полимерных композиционных материалах при ударных воздействиях различной природы.*

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

L.A. Kasharina<sup>1</sup>, V.V. Makhsidov<sup>1</sup>**IDENTIFICATION OF DEFECTS IN POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS BY FIBER BRAGG GRATING RESPONSE (review). Part II**

*The paper discusses the methods of detection, differentiation of the type of defects and their localization in polymer composite materials using embedded fiber-optic sensors using direct fiber-optic interrogation with an increased sampling rate of sensors. The types and stages of occurrence of defects are considered and the stages of their growth are described. The specific features of the response form from fiber-optic sensors are presented, which allow the analysis of formation mechanisms and the identification of defects types that occur in polymer composites under impact effects of different nature.*

**Keywords:** defect identification, structure monitoring, polymer composite materials, fiber optic Bragg grating, deformation, impact damage.

<sup>1</sup>Федеральное 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**

Рассмотрение неразрушающих методов обнаружения и идентификации повреждений конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), появляющихся вследствие ударных воздействий различной природы, особенно актуально, так как с развитием технологий ремонта и создания новых способов самозалечивания в ПКМ становится возможным продление срока эксплуатации конструкции.

В то же время ассортимент ПКМ, применяемых для создания изделий авиационного назначения, непрерывно расширяется [1–3]. Повышаются требования к прочности материалов, к усталостным характеристикам, в том числе и требования по устойчивости к ударным воздействиям. Вследствие этого появляется задача эффективного

контроля состояния конструкции из ПКМ в первую очередь методами неразрушающего и встроенного контроля [4–7].

Несмотря на широкое распространение и значительное увеличение интереса к данному вопросу во всем мире, остается много вопросов к точности интерпретации и локализации ударных воздействий, в связи с этим проведение работ по анализу методов идентификации дефектов, появляющихся в результате ударных воздействий, является своевременным и актуальным.

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].

### **Идентификация дефектов, возникающих в полимерных композиционных материалах и появляющихся вследствие ударных воздействий различной природы**

Способы идентификации дефектов в ПКМ, возникающих вследствие ударных (динамических) воздействий, во многом схожи со способами идентификации усталостных воздействий, а главной особенностью, как правило, является частота опроса и чувствительность датчиков, воспринимающих воздействие. Так, для идентификации повреждений применяются как оптоволоконные датчики, волоконные брэгговские решетки, так и пьезоэлектрические датчики, регистрирующие, в том числе, акустические сигналы и волны Лэмба.

Как правило, идентификация типа дефекта в ПКМ, возникающего в результате ударного воздействия, начинается с оценки энергии удара. Выделяют низко- и высокоэнергетичные ударные воздействия на ПКМ, но явно выраженной границы раздела между этими понятиями нет. Существует несколько классификационных признаков, таких как характеристика материала или точные границы скоростей ударника (при проведении испытаний) – например, низкоскоростным ударом принято считать перемещение падающего ударника со скоростью до 10 м/с, высокоскоростным – до 100 м/с и сверхвысокоскоростным (баллистическим) – до 1000 м/с, но и эти цифры довольно условны [8, 9]. Подобным классификационным признаком также является энергия удара, которая в некоторых случаях может быть более удобной и информативной для оценки удара. Необходимо также отметить, что наиболее опасным, с точки зрения дальнейшей эксплуатации конструкции, является низкоскоростной удар, так как разрушения, появляющиеся вследствие такого воздействия, часто не видны на поверхности конструкции из ПКМ и при визуальном осмотре не могут быть обнаружены [10–12]. Для низкоскоростного ударного воздействия также принято особое определение – едва видимое ударное повреждение (BVID – от англ. barely visible impact damage) [13, 14].

Обособленно в классификации типов ударных повреждений стоит температурный удар (локальный высокоэнергетичный нагрев), отличающийся основным внешним воздействием и механизмом образования дефектов, который будет рассмотрен далее более подробно.

Важным этапом при идентификации дефектов в ПКМ, возникающих вследствие ударного воздействия, также является обработка получаемого сигнала от оптоволоконной брэгговской решетки (ВБР) и локализация места разрушения в конструкции. Наиболее часто для обработки сигнала от ВБР применяют метод быстрого Фурье-преобразования (FFT), Вейвлет-преобразования Шеннона, теорию нечетких доказательств (FETF) и другие, но появляется все больше методов, уточняющих и улучшающих эффективность вышеуказанных методов [10, 15, 16].

### Идентификация дефектов в ПКМ по анализу сигналов от ВБР, формирующихся при низко- и высокоскоростных ударных воздействиях

Регистрация ударных воздействий и определение типа дефектов по отклику от ВБР в настоящее время проходит стадию перерождения, опровергая более ранние выводы о невозможности широкого практического применения ВБР для регистрации и идентификации ударных воздействий на ПКМ в связи с очень низкой частотой опроса чувствительных элементов. Так, появляются новые работы, например [10, 17], в которых показано успешное применение ВБР для идентификации и локализации ударных воздействий и подтверждено высокоточное определение места ударного воздействия. Благодаря использованию лазера с широкозонной модуляцией, стало возможным увеличение частоты и скорости опроса ВБР и повышение точности локализации. Такие доработки способствуют применению легких и электромагнитно независимых датчиков ВБР в качестве отличной альтернативы ультразвуковому контролю.

Определение типов усталостных дефектов по форме спектра ВБР [18] является в некоторой степени несложным процессом и в ходе анализа спектра ВБР становится очевидным тип дефекта – расслоение, трещина в матрице и т. д. Однако идентификация дефекта, возникшего в ходе ударного воздействия, является более сложным процессом по ряду причин: в силу высокой скорости процесса, величины приложенного воздействия и других факторов. В связи с этим в случае ударных воздействий чаще говорят о механизме возникновения и распространения дефектов, а началом чаще всего служит первая, появляющаяся в ходе удара, трещина в матрице ПКМ. Необходимо также отметить, что применение датчиков на основе ВБР является наиболее информативным при оценке низкоскоростных ударных воздействий. Как видно из рис. 1, центральная длина волны каждого датчика ВБР волнообразно сдвигается приблизительно на 0,18 с.

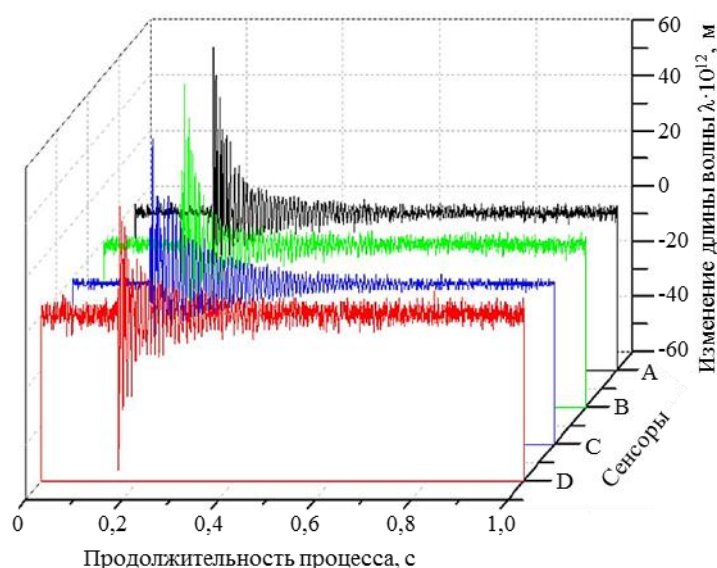


Рис. 1. Спектры откликов датчиков от волоконных брэгговских решеток [10]

По приведенным откликам (рис. 1) можно отслеживать только сдвиг резонансных длин волн ВБР, но о форме спектра судить невозможно. Такой отклик с высоким коэффициентом шума свидетельствует о мгновенном возбуждении колебаний в ПКМ в результате ударного воздействия длительностью  $\sim 0,18$  с с амплитудой сигнала, постепенно ослабевающей до полного затухания. Такой сигнал датчика ВБР может быть обработан с помощью быстрого Фурье-преобразования и стать более информативным (рис. 2).

Амплитуды сигналов датчиков ВБР меняются под влиянием энергии удара, в то время как формы спектров остаются практически неизменными. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что механизм образования и распространения дефектов в ПКМ одинаков в тех местах конструкции, в которых расположены датчики ВБР.

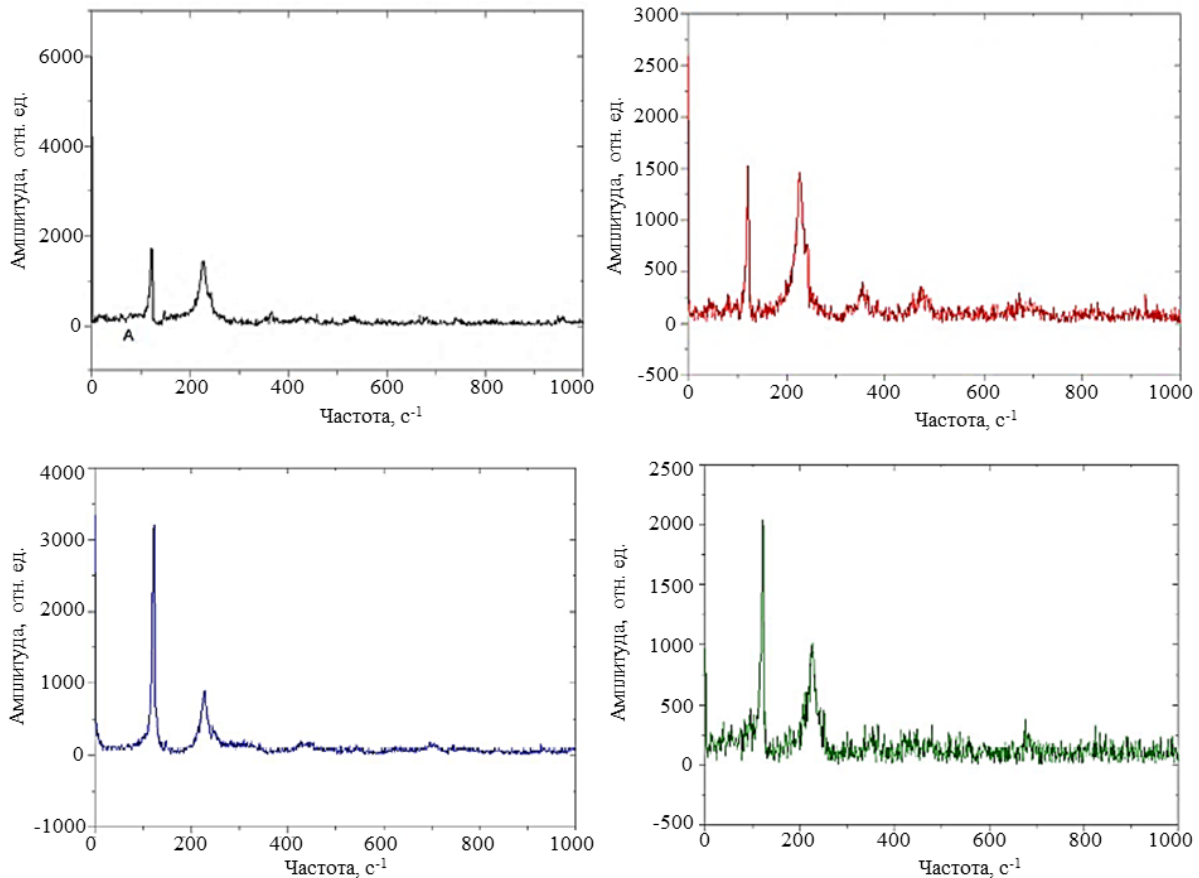


Рис. 2. Спектры откликов датчиков от волоконных брэгговских решеток после быстрого Фурье-преобразования [10] для сенсоров А (а), В (б), С (в) и D (г)

В данной ситуации возникает также предположение о том, что сходство формы спектров связано с изначальным внесением некоторых напряжений (дефектов) в ПКМ при интеграции оптоволокна диаметром 125 мкм с ВБР в структуру материала. Так, в работе [19] показано, что при использовании оптоволокна диаметром 52 мкм с ВБР для интеграции в структуру ПКМ удастся значительно уменьшить вносимые напряжения и деформации. Применение такого тонкого волокна позволяет избежать появления высокого соотношения сигнал/шум при регистрации и локализации ударных воздействий.

Согласно исследованиям авторов работы [20], в результате ударного воздействия происходит зарождение трещины в матрице ПКМ и далее рост трещины описывается двумя этапами:

- трещина растет в том же направлении, в котором приложена нагрузка, и доходит до «затупления» за счет интенсивного образования микротрещин;
- трещина меняет направление, а дальнейшее ее развитие происходит аналогично росту магистральной трещины.

Необходимо отметить, что степень разрушающего напряжения на второй стадии как минимум в 2 раза превышает данный показатель первой стадии, а при ударном

воздействии микронапряжения в ПКМ распространяются довольно неравномерно и максимально сконцентрированы в области контакта. Релаксация скопленных микронапряжений проходит путем продольного растрескивания, роста трещины и окончательным разломом частей ПКМ в месте удара.

Для дальнейшего исследования разрушения ПКМ применяют методы определения предела прочности при сжатии после ударного воздействия. Как правило, при приложении сжимающей нагрузки на образец из ПКМ начинается и развивается процесс расслоения материала в области ударного воздействия перпендикулярно направлению сжимающего усилия [9, 14, 21]. Затем процесс разрушения под действием сжимающей нагрузки приводит к разрушению волокон матрицы, что существенно снижает предел прочности при сжатии конструкции из ПКМ.

Прочность при сжатии после удара ( $\sigma_{CAI}$ ) рассчитывается на основе максимальной нагрузки ( $P_{max}$ ) и площади поперечного сечения образца по формуле [14]

$$\sigma_{CAI} = P_{max} / (b \cdot h),$$

где  $b$  и  $h$  – длина и ширина образца соответственно, CAI (от англ. compression after impact) – сжатие после удара.

Высокоскоростные и сверхвысокоскоростные (баллистические) удары приводят к дефектам со значительными расслоениями и отделениями фрагментов материала в области ударного воздействия и становятся отчетливо видимыми при визуальном осмотре. Так, испытания, проводившиеся группой авторов [22], показывают, что образцы стеклопластика в 4 и 6 слоев под воздействием ударов со скоростями, незначительно превышающими и незначительно не достигающими баллистического предела, подвергаются расслоению. В результате попадания снаряда в мишень верхние слои материала смешаются в поперечном направлении, что приводит к сжатию в плоскости и межслойному растрескиванию. В случае удара со скоростью менее баллистического предела разрушение материала не переходит в стадию отделения фрагментов, как это наблюдается в случае удара со скоростью, превышающей баллистический предел, но наблюдаемый характер разрушения материала в обоих случаях одинаков. Повреждение начинается с растрескивания матрицы, за которым следует снижение межслойной прочности ПКМ, а дальнейшая нагрузка и деформация вызывают расслоение и отделение фрагментов материала. При этом важно отметить, что разрушение волокон наполнителя при сверхвысокоскоростном ударе происходит одинаково, независимо от ориентации наполнителя при укладке.

При регистрации ударных воздействий в отклике ВБР также наблюдаются значительные изменения, указывающие на практически мгновенное расслоение. Так, в работе [23] показано, что до ударного воздействия и при статической нагрузке спектр отклика ВБР характеризуется тем, что с постепенным повышением нагрузки резонансная длина волны сдвигается в ту или иную сторону и происходит незначительное снижение амплитуды сигнала, в то время как при ударном воздействии не происходит сдвига резонансной длины волны оптоволоконного датчика и амплитуда сигнала резко снижается. Такое изменение формы спектра сигнала ВБР свидетельствует о том, что датчик теряет сцепление с материалом за счет значительного расслоения и разрушения ПКМ. Таким образом, описанное изменение формы спектра, происходящее в течение нескольких секунд, является четким признаком высокоскоростного или сверхвысокоскоростного ударного повреждения.

### Идентификация дефектов в ПКМ по анализу сигналов от ВБР, формирующихся при температурных ударных воздействиях

При изучении методов идентификации дефектов в ПКМ, возникающих вследствие ударных воздействий различной природы, необходимо отметить и ударное температурное воздействие. Ударные температурные воздействия на изделия из ПКМ случаются реже механических, но их идентификация и локализация представляет собой не менее важную задачу. Сложность решения такой задачи заключается в качественной изоляции ВБР от механической деформации и, вследствие этого, искажения результатов измерений из-за температурного расширения материала.

Так, в работе [24] авторы исследовали способ крепления сети датчиков ВБР на образце, позволяющий быстро и точно проводить измерения температуры. Исключение механических воздействий проводилось за счет интегрированной ВБР, показания которой учитывались при расчете значений температуры. Представленная сеть датчиков ВБР, измеряющих температуру, также позволяет проводить локализацию ударного температурного воздействия.

Авторы работы [24] проводили испытания образцов ПКМ со стекло- и углеволоконными наполнителями на устойчивость к термоудару в воздушной среде и в потоке азота. Такие эксперименты позволили установить, что условия окружающей среды значительно влияют на форму отклика датчика ВБР (рис. 3).

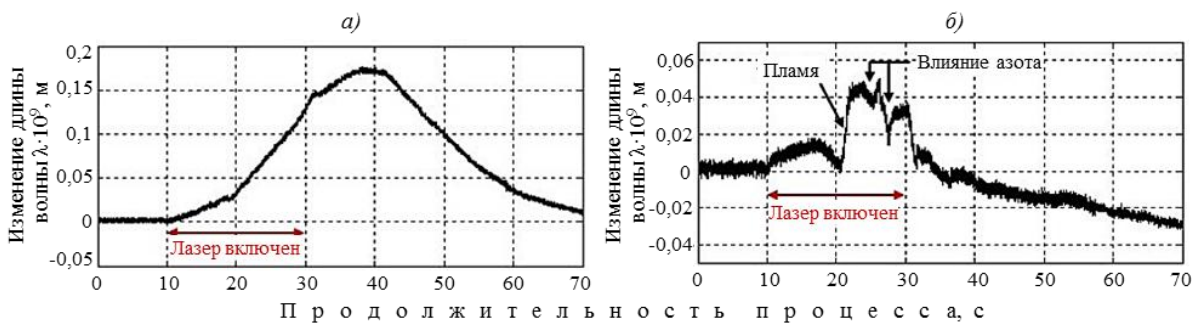


Рис. 3. Спектры откликов от волоконных брэгговских решеток, размещенных на образцах из угле- (а) и стеклопластика (б) [24]

Необходимо также отметить, что в общем случае высокотемпературный удар (нагрев) приводит к тому, что спектр отклика изменяет свою форму и отображает частые подъемы и спады интенсивности сигнала, а при повышении температуры удара амплитуда описанных колебаний интенсивности значительно снижается. При этом весь спектр отклика имеет вид кривой, характерной для окончания процесса затухания колебаний.

### Обсуждение и заключения

В настоящее время рассмотренные возможности идентификации дефектов в ПКМ по отклику оптоволоконных сенсоров (в силу специфического технологического процесса интеграции датчиков) имеют свои недостатки и достоинства. В связи с этим для более полноценного определения типа дефекта и механизма его распространения целесообразно применение комплекса, состоящего из нескольких методов, уже рассмотренных ранее в данной работе. Эффект, получаемый от использования нескольких взаимодополняющих методов, может позволить создавать подробные базы данных о типах дефектов в ПКМ, причинах их возникновения, методах наиболее эффективной диагностики и идентификации, механизмах развития дефектов и повреждений, способов ремонта и т. д.

В заключении необходимо отметить, что основными критериями идентификации типа дефектов и повреждений по спектрам откликов оптоволоконных брэгговских решеток при статических и циклических нагрузках являются изменения формы спектра (расширение, расщепление на две и более частей) и сдвиг резонансной длины волны без значительных изменений амплитуды сигнала, характеризующие появление трещин, начальные стадии и развитие расслоений и другие виды дефектов. В свою очередь, основными критериями при идентификации ударных воздействий являются значительные изменения амплитуды спектров откликов ВБР (для высокоскоростных и сверхвысокоскоростных (баллистических) ударных воздействий), а также повышенный уровень шума в необработанном спектре (для низкоскоростных ударных воздействий). В то же время изменения формы спектров откликов оптоволоконных датчиков при высокотемпературных ударных воздействиях характеризуются в основном изменениями амплитуды, аналогичными затухающим процессам.

## 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. Беклемишева К.А., Петров И.Б. Моделирование разрушения гибридных композитов под действием низкоскоростного удара // Математическое моделирование. 2018. Т. 3. №11. С. 27–43.
9. Кудрин А.М., Караева О.А., Габриельс К.С., Солопченко А.В. Определение предела прочности полимерного композиционного материала на сжатие после удара в соответствии со стандартом ASTM D 7137 // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та, 2018. Т. 14. №2. С. 164–169.
10. Zhao G., Li S., Hu H. et al. Impact localization on composite laminates using fiber Bragg grating sensors and a novel technique based on strain amplitude // Optical Fiber Technology. 2018. Vol. 40. P. 172–179. DOI: 10.1016/j.yofte.2017.12.001.
11. Rezayat A., De Pauw B., Lamberti A. et al. Reconstruction of impacts on a composite plate using fiber Bragg gratings (FBG) and inverse methods // Composite Structures. 2016. Vol. 149. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.03.065.
12. Kim H., Shin H., Lee M., Kwac L. Impact Properties of Laminating Type in EVA and CFRP // Indian Journal of Science and Technology. 2015. Vol. 8 (26). P. 1–7. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i326/80679.

13. Ostré B., Bouvet C., Minot C., Aboissiére J. Experimental analysis of CFRP laminates subjected to compression after edge impact // *Composite Structures*. 2016. Vol. 152. P. 767–778. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.05.068.
14. García-Moreno I., Caminero M.Á., Rodríguez G.P., López-Cela J.J. Effect of Thermal Ageing on the Impact Damage Resistance and Tolerance of Carbon-Fibre-Reinforced Epoxy Laminates // *Polymers*. 2019. Vol. 11. No. 160. DOI: 10.3390/polym11010160.
15. Li H., Wang Z., Forrest J., Jiang W. Low-Velocity Impact Localization on Composites Under Sensor Damage by Interpolation Reference Database and Fuzzy Evidence Theory // *Access IEEE*. 2018. Vol. 6. P. 31157–31168. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2844802.
16. Jiang M., Sai Y., Geng X., Sui Q. Development of an FBG Sensor Array for Multi-Impact Source Localization on CFRP Structures // *Sensors*. 2016. Vol. 16. No. 1770. P. 1–12. DOI: 10.3390/s16101770.
17. Sai Y., Zhao X., Wang L., Hou D. Impact Localization of CFRP Structure Based on FBG Sensor Network // *Photonic Sensors*. 2019. DOI: 10.1007/s13320-019-0546-9.
18. Кашарина Л.А., Махсидов В.В., Смирнов О.И., Рузаков И.А. Дифференцирование дефектов в ПКМ по отклику волоконно-оптических сенсоров (обзор). Часть I // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №2 (74). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-97-104.
19. 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.
20. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Панин С.В. и др. Структурные уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении // *Физическая мезомеханика*. 2014. Т. 17. №2. С. 65–83.
21. Han G., Guan Z., Li X., Du S. Failure analysis of carbon fiber reinforced composite subjected to low velocity impact and compression after impact // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2016. DOI: 10.1177/0731684415627381.
22. Ganesh Babu M., Velmurugan R., Gupta N.K. Heavy mass projectile impact on thin and moderately thick unidirectional fiber/epoxy laminates // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2007. No. 4. P. 247–265.
23. Dellicolli A. Development of self-diagnostic composite structures using embedded fiber-bragg grating sensors: master of science dissertation. Michigan State University, 2012. URL: <https://d.lib.msu.edu/etd/434> (дата обращения: 11.04.2019). DOI: 10.25335/M5VB6J.
24. Brian Jenkins R., Joyce P., Mechtel D. Localized Temperature Variations in Laser-Irradiated Composites with Embedded Fiber Bragg Grating Sensors // *Sensors*. 2017. Vol. 17. No. 251. P. 2–18. DOI: 10.3390/s17020251.