

Баранов М.А., Никифоров А.С., Микрюков А.О., Ермаков Д.А. Расчетные и экспериментальные исследования оценки механического поведения образцов из полимерных композиционных материалов с внедренным Smart-слоем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 4. – С. 162–177. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.15

Baranov M.A., Nikiforov A.S., Mikryukov A.O., Ermakov D.A. Numerical and experimental research of the evaluation of the mechanical behavior of carbon fiber reinforced polymerspecimens with an embedded Smart-layer. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2021, no. 4, pp. 162-177. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.15



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2021

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.15

УДК 539.3

РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВНЕДРЕННЫМ SMART-СЛОЕМ

М.А. Баранов, А.С. Никифоров, А.О. Микрюков, Д.А. Ермаков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 1 сентября 2021 г.
Принята: 25 декабря 2021 г.
Опубликована: 30 декабря 2021 г.

Ключевые слова:

волоконно-оптические датчики, Smart-слой, напряжённо-деформированное состояние, физико-механические характеристики, квазистатическое нагружение, жёсткость, прочность, численное моделирование, полимерные композиционные материалы, FDM, 3D-печать.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время особое внимание ученых направлено на возможность создания так называемых Smart-конструкций, которые способны проводить самодиагностику в режиме реального времени и/или функциональные изменения. В рамках данной работы рассматривается возможность создания конструкций, способных проводить диагностику деформационного состояния в режиме реального времени.

При создании таких Smart-конструкций в качестве датчиков контроля, как правило, используют волоконно-оптические, пьезо- и тензометрические. Их применение обуславливается рядом преимуществ, таких как: малые размеры, возможность объединения в единую измерительную сеть, простота в использовании, широкий спектр измеряемых величин, способность передавать данные на большие расстояния. Однако при внедрении таких датчиков в конструкции возникает ряд сложностей: установки/демонтажа или внедрения в силу хрупкости волокна, сложность базирования чувствительного элемента, обеспечение целостности волоконно-оптической линии на выходе из полимерной конструкции.

Авторским коллективом Научно-образовательного центра авиационных композитных технологий ПНИПУ разработан прототип Smart-слоя по технологии 3D-печати, способный решить описанные выше проблемы. Однако открытым остается вопрос изменения физико-механических характеристик конструкций из полимерных композиционных материалов со Smart-слоем. Таким образом, целью данной работы является проведение расчетных и экспериментальных исследований по оценке механического поведения образцов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с внедренным Smart-слоем. Описана технология и схема изготовления Smart-слоя с внедренными волоконно-оптическими датчиками, а также схема укладки Smart-слоя в образцы из ПКМ. Поскольку свойства образцов из литых пластиков отличаются от напечатанных, проведены механические испытания на растяжение напечатанных образцов. Полученные значения предела прочности и модуля упругости использовались для идентификации математической модели. В рамках экспериментальной части проведены механические испытания на растяжение, сжатие и межслоевой сдвиг образцов из ПКМ с внедренным Smart-слоем. При анализе полученных экспериментальных результатов установлено, что максимальное процентное отклонение физико-механических характеристик (ФМХ)

© Баранов Максим Алексеевич – асп., e-mail: maximbaranov.123@gmail.com, ID: 0000-0002-5600-1526.

Никифоров Александр Сергеевич – асп., e-mail: aleksandr.niciforov@gmail.com, ID: 0000-0001-5360-2484.

Микрюков Антон Олегович – асп., e-mail: anto-mikryuko@yandex.ru, ID: 0000-0002-3005-7599.

Ермаков Денис Александрович – асп., e-mail: den032895@yandex.ru, ID: 0000-0002-3584-1286.

Maksim A. Baranov – PhD student, e-mail: maximbaranov.123@gmail.com, ID: 0000-0002-5600-1526.

Aleksandr S. Nikiforov (Perm, Russia Federation) – PhD student, e-mail: aleksandr.niciforov@gmail.com, ID: 0000-0001-5360-2484.

Anton O. Mikryukov – PhD student, e-mail: anto-mikryuko@yandex.ru, ID: 0000-0002-3005-7599.

Denis A. Ermakov – PhD student, e-mail: den032895@yandex.ru, ID: 0000-0002-3584-1286.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

составляет не более 15 %, что лежит в рамках разброса ФМХ углепластика в рулоне препрега. Вследствие полученных данных можно сделать вывод, что внедрение таких Smart-слоев несущественно влияет на ФМХ итоговой конструкции из ПКМ.

По результатам математического моделирования по растяжению образца из ПКМ с внедренным Smart-слоем установлено, что максимальное значение нормальных напряжений в образце достигает 540,28 МПа, что на 1,46 % превышает максимальное значение по статистическому пределу прочности образца. Максимальные значения напряжений по Мизесу для Smart-слоя не превышают значения предельной прочности, в то время как для эпоксидного связующего наблюдается существенное превышение предела прочности, на основании которого можно сделать предположение о его разрушении в процессе деформирования.

© ПНИПУ

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE EVALUATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMERSPECIMENS WITH AN EMBEDDED SMART-LAYER

M.A. Baranov, A.S. Nikiforov, A.O. Mikryukov, D.A. Ermakov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 01 September 2021

Accepted: 25 December 2021

Published: 30 December 2021

Keywords:

fiber-optic sensors, Smart-layer, stress-strain state, physical and mechanical properties, quasi-static loading, stiffness, strength, numerical modeling, carbon fiber reinforced polymer, FDM, 3D-printing.

ABSTRACT

Currently, scientists have paid special attention to the possibility of creating so-called Smart-structures that are capable of real-time self-diagnostics and/or functional changes. Within the framework of this work, the possibility of creating structures capable of diagnosing the deformation state in real-time is considered.

When creating such Smart-structures, fiber-optic, piezo-, and strain-gauge sensors are usually used as control sensors. The use of such sensors is due to a number of their advantages, such as small size, the ability to integrate into a single measuring network, ease of use, a wide range of measured values, the ability to transmit data over long distances. However, when such sensors are embedded into the structure, several difficulties arise in installation/dismantling or implementation due to the fragility of the fiber, the difficulty of locating the sensitive element, ensuring the integrity of the fiber-optic sensors at the exit from the polymer structure.

The team of the Scientific and Educational Center of Aviation Composite Technologies, PNRPU, has developed a prototype of a Smart-layer based on 3D-printing technology, capable of solving the problems described above. However, the influence of such an embedding on the structure of structures made of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) remains open. Thus, this work aims to carry out computational and experimental studies to assess the mechanical behavior of CFRP samples with an embedded Smart-layer.

Within the framework of this work, the technology and scheme for manufacturing a Smart-layer with embedded fiber-optic sensors, as well as a scheme for laying a Smart-layer into CFRP samples, are described. Since the properties of molded plastic specimens differ from those of printed specimens, mechanical tensile tests of printed specimens were carried out. The obtained values of the strength limit and the modulus of elasticity were used to identify the mathematical model. Within the framework of the experimental part, mechanical tests for tension, compression, and interlayer shear of CFRP samples with an embedded Smart-layer were carried out. When analyzing the obtained experimental results, it was found that the maximum percentage deviation of the physical and mechanical characteristics (PMC) is no more than 15 %, which lies within the spread of the PMC of carbon fiber in a prepreg roll. As a result, we can conclude that the embedded of such Smart-layers does not significantly affect the PMC of the final CFRP structure.

According to the results of mathematical modeling of the tensile strength of a CFRP sample with an embedded Smart-layer, it was found that the maximum value of normal stresses in the sample reaches 540,28 МПа, which is 1,46 % higher than the maximum value for the statistical ultimate strength of the sample. The maximum values of the Mises stress for the Smart-layer do not exceed the ultimate strength, while for the epoxy binder there is a significant excess of the ultimate strength, on the basis of which one can make an assumption about its destruction during deformation.

© PNRPU

Введение

В настоящее время ученые всего мира исследуют возможность создания и применения так называемых Smart-конструкций, которые, как правило, бывают двух типов – для контроля (способные проводить диагностику различных параметров) и для функциональных изменений (управление геометрией, снижение вибраций и шумов) [1–3]. Для первого типа Smart-конструкций используются волоконно-оптические, пьезо- и тензодатчики. Примене-

ние таких датчиков при проведении контроля состояния позволяет судить об эволюции деформационных и температурных полей в процессе эксплуатации конструкций. При создании конструкций, способных в процессе эксплуатации управлять и изменять свою форму, используют пьезоэлектрические актуаторы. Использование таких актуаторов, например, позволяет изменять угол закрутки вертолетной лопасти в соответствии с аэродинамическими параметрами воздушного потока [4]. В настоящей работе особое внимание уделено Smart-конструкциям первого типа.

Широкое применение волоконно-оптических и тензометрических датчиков в Smart-конструкциях первого типа связано с рядом их преимуществ: малые размеры, возможность объединения в единую измерительную сеть, простота в использовании, широкий спектр измеряемых величин, способность передавать данные на большие расстояния [5]. Кроме того, применение таких Smart-конструкций позволяет снизить стоимость ремонта за счет предварительного предупреждения о возможном повреждении конструкции [6]. Датчики контроля могут быть как смонтированы на поверхность Smart-конструкции, так и внедрены в ее структуру на этапе изготовления.

В работе [7] приведен пример Smart-конструкции, а именно железнодорожной рельсы со смонтированными на поверхности волоконно-оптическими датчиками (ВОД) на основе решеток Брэгга. Авторы размещали две волоконные брэгговские решетки (ВБР) на рельсовом пути с целью точного измерения продольной силы. Полученные экспериментальные данные сравнивались с теоретическими оценками. В результате установлено, что точность измерений равна 95 %.

Применение ВОД на основе обратного рассеяния Рэлея для диагностики железнодорожного туннеля, подверженного оползням, описано в работе [8]. Оптиковолоконные линии были размещены по всей длине двух стен туннеля. ВОД на основе обратного рассеяния Рэлея в течение двух лет регистрировали деформации, после чего были определены области локализации деформаций и построена картина их эволюции. Применение такой Smart-конструкции продемонстрировало высокую эффективность и надежность.

Эффективность применения двух различных датчиков контроля для создания железобетонной балки с тензометрическими и волоконно-оптическими датчиками приведено в работе [9]. Авторами было установлено, что ВОД позволяют более точно регистрировать деформации. Исследование термических деформаций дорожного покрытия с внедренными ВОД описано в работе [10]. Исследуемая плита подвергалась нагреву с последующим охлаждением для регистрации скручивания. Полученные в рамках натурального эксперимента данные сравнивались с численными результатами для вычисления зависимостей кривизны от изменения температуры.

Волоконно-оптические датчики нашли широкое применение не только в гражданской, но и в авиационной и аэрокосмической отрасли. Güemes et al. [11] изготовили решетчатую конструкцию из ПКМ, предназначенную для использования в космосе с габаритными размерами 1100 мм в высоту и диаметром 800 мм. Изготовление конструкции производилось методом роботизированной выкладки с 36 датчиками ВБР. Авторами получены значения деформаций в ходе проведения испытаний по усталостному нагружению на сжатие. Несмотря на то что в результате первоначального нагружения несколько стержней сломались, конструкция сохранила свою несущую способность. Know и et al. [12] внедрили датчики на основе ВБР в композитное крыло и оценили погрешность измерения нагрузки на крыло, ко-

торая составила 4,19 %. В работе [13] представлены и обобщены экспериментальные исследования ВОД, встроенных в композитные элементы вертолета. Авторами рассмотрен вопрос о внедрении оптических волокон в композиты, приведены результаты показаний ВОД, внедренных в вертолетный лонжерон, с существующим расслоением в процессе динамического нагружения.

Таким образом, Smart-конструкции с возможностью самодиагностики с датчиками на основе ВОД являются востребованными в различных отраслях промышленности. Однако большинство авторов отмечает ряд сложностей с применением ВОД в качестве датчиков контроля, как при поверхностном монтаже, так и внедрении в структуру конструкции, а именно сложности установки/демонтажа или внедрения в силу хрупкости волокна, сложность базирования чувствительного элемента, обеспечение целостности ВОД на выходе из полимерной конструкции [14–17].

При решении описанных выше проблем авторы используют различного рода «упаковки» для защиты ВОД. Первую коммерческую упаковку, названную Smart Layer, для датчиков диагностики (пьезо- и ВОД) изготовила компания Acellent Technologies, Inc. В работе [18] описывается процесс изготовления Smart Layer. Авторы используют печатную диэлектрическую плату из полиимида, в которую внедряются пьезо- или ВОД. Однако, несмотря на продемонстрированную эффективность, Smart Layer обладает рядом недостатков, которые накладывают ограничения на ее внедрение в различные конструкции. К таким недостаткам относятся большая толщина (толщина Smart Layer достигает 3–4 мм) и плохая адгезия к углепластикам, так как в Smart Layer используется полиимидная пленка.

Четыре встроенных оптиковолоконных датчика акустической эмиссии с плавленным конусом для определения местоположения удара пластины из полимерных композиционных материалов (ПКМ) используются в работе [19]. Для обеспечения защиты волоконных датчиков применяется «усовершенствованный» соединитель с капиллярной трубкой из диоксида кремния. Авторы предлагают алгоритм определения источника акустической эмиссии, основанный на пересечении гипербол, которое определяется различиями во времени регистрации сигналов, полученных датчиками. Полученные в рамках исследования результаты локализации хорошо согласуются с фактической областью приложения удара.

Исследование возможности точной регистрации ВОД внешних параметров литий-ионных компонентов для последующего встраивания в батареи и аккумуляторы приведено в [20]. В упомянутой работе описано изготовление высокопроизводительной литий-ионной «крупноформатной карманной ячейки». Авторы отмечают особую сложность при изготовлении, а именно необходимость разработки подходящего метода герметизации для предотвращения утечек вблизи точки входа волоконной линии. Волоконную линию с двумя ВБР обергивали «термосварочной» пленкой, при этом ВБР для регистрации температуры была дополнительно встроена в специальную трубку (для исключения регистрации деформаций). Далее литий-ионная ячейка с внедренной упакованной линией оборачивалась «термо-

сварочной» пленкой, и проводилось прессование пакета для предотвращения образования пустот и герметизации ячейки. В процессе проведения испытаний по проникновению влаги в «пакет» было установлено, что внедрение упаковки с волоконной линией не влияет на скорость проникновения влаги и пакет остается герметичным. В процессе эксплуатационного нагружения ВОД точно регистрируют деформацию и температуру в герметичной литий-ионной ячейке, вследствие чего такие ячейки будут востребованы для аккумуляторов электромобилей.

Обширный обзор различного рода упаковок для защиты ВОД приведен в работе [21]. Авторы описывают эффективность обнаружения боковых нагрузок ВОД, упакованных в цилиндрическую трубу из силиконовой резины. Упаковки для ВОД из угле- и стеклопластиков, изготовленные по технологиям вакуумной инфузии и автоклавного формования, хорошо подходят для обнаружения и локализации дефектов, а также регистрации деформаций при динамической и статической нагрузке. Кроме того, рассматриваются вопросы, связанные с выбором клеев для поверхностного монтирования различных упаковок и точности регистрации деформаций. В работе отмечено, что для длительного мониторинга упаковки необходимо монтировать на эпоксидные клеи с длительным сроком эксплуатации, в то время как для краткосрочного мониторинга подходят цианакрилатные клеи.

В исследовании [22] описан мониторинг форм макродеформаций моста в эксплуатационных условиях. В течение года собственные частоты и формы деформаций определялись каждый час. Динамические макродеформации моста отслеживались с помощью четырех волоконных линий с 20 датчиками на каждой. Для обеспечения защиты волоконных линий использовалась упаковка из армированного стеклопластика. В качестве дополнительной защиты упаковок и исключения влияния быстрого изменения температуры применялась теплоизоляционная пластиковая пленка. Таким образом, модальные характеристики моста в автоматическом режиме определялись с помощью алгоритма иерархической кластеризации. Собственные частоты и формы деформаций десяти мод точно и непрерывно определялись в течение всего периода мониторинга. Кроме того, авторы исследовали влияние температуры на собственные частоты и формы деформаций.

Исследование возможности регистрации зарождения трещин при помощи оптоволоконного датчика Бриллюэна короткого калибра представлено в работе [23]. Там отмечено, что при зарождении и росте трещин возможны повреждения ВОД, что приведет к невозможности мониторинга, вследствие чего авторы разработали упаковку, способную защитить ВОД. Предлагаемая конструкция датчика включает в себя волокно Брюллиэна для измерения деформаций, внешнюю муфту, образующую гибкий кабельный датчик простой конструкции. Муфта изготавливалась из мягкого пластика и полиамида с внешним диаметром 0,9 мм. Далее датчик с защитной муфтой помещался во втулку с внутренним диаметром 1,5 мм. Втулка состоит из внутреннего стяжного слоя из нержавеющей стали и внешнего пла-

стикового слоя и предназначена для двух основных функций: защита внутреннего датчика и формирования короткого замкнутого датчика. Стяжной слой из нержавеющей стали обеспечивает необходимую прочность, защищая от возможных механических воздействий при росте трещины, и обеспечивает высокую стойкость к коррозии. При монтировании датчиков на поверхность исследуемой конструкции авторы используют специально разработанный гель, который при отверждении обеспечивает еще один эффективный защитный слой. Для проверки работоспособности разработанного датчика авторы провели тестовые испытания по обнаружению трещин в закрытом туннеле. По результатам испытаний исследователи отмечают, что разработанный датчик демонстрирует превосходную способность регистрации трещин. Однако количественная оценка размера трещины зависит от измерительной длины самого датчика, поскольку датчик меньшего размера, как правило, более чувствителен к изменению размера трещины. Таким образом, требуются дальнейшие исследования зависимостей размера датчика от реального масштаба конструкций.

Мониторинг отверждения композиционного материала на основе углепластика и алюминиевого сплава в режиме реального времени при помощи инкапсулированного волокна описан в [24]. Под инкапсулированным волокном авторы понимают волоконную линию с тремя ВБР, упакованную в капиллярную трубку из нержавеющей стали длиной 20 см, внешним диаметром 0,7 мм, внутренним – 0,4 мм. Капиллярная трубка герметизировалась эпоксидной смолой, чтобы избежать движения волоконной линии и попадания смолы внутрь трубки в процессе отверждения. Для оценки точности измерения такой упаковки рядом с капиллярной трубкой устанавливалась высокоточная термopара. Перед непосредственным внедрением в углепластик ВБР были откалиброваны в тестовом испытании нагрева. После калибровки ВБР авторы изготавливали следующий сэндвич-ламинат: алюминиевый сплав, клеевой слой, ламинат из углепластика. Упаковка ВБР внедрялась в клеевой слой. После укладки ламината собирался вакуумный пакет, который транспортировался в печь для проведения режима отверждения. По результатам режима отверждения авторы сделали следующие выводы: ВБР регистрируют деформации на всех стадиях химической реакции (жидкость/вязкое течение – состояние геля – твердое тело); данные об изменении температуры, зарегистрированные ВБР, хорошо согласуются с теоретическими оценками; предложенная система мониторинга позволяет идентифицировать начало и конец стадии гелеобразования и стадии ретикуляции.

Юн и др. [25] анализировали продольные деформации железнодорожного моста длиной 40,26 м при прохождении по нему поезда со скоростью 15 км/ч при помощи ВОД на основе обратного рассеяния Бриллюэна. ВОД на основе обратного рассеяния Бриллюэна, упакованные в буфер из конструкционного термоэластопласта марки Hytrel, дополнительно защищались ПЭТ-пленкой толщиной 0,3 мм и прикреплялись к наружной поверхности рельс. Продольные деформации, получен-

ные с ВОД, сравнивались с результатами, которые были получены с тензометрических датчиков.

В [9] для диагностики напряженно-деформированного состояния (НДС) моста авторы использовали две ВБР, упакованные в стеклянную трубку длиной 250 мм. Стеклянная трубка при помощи болтов прикреплялась к поверхности бетона. Авторы отмечают, что такая стеклянная трубка с ВБР позволяет получить полную картину НДС, однако стоимость такой трубки является высокой. В связи с этим в работе [15] исследована возможность изготовления простой и недорогой упаковки ВБР, способной обеспечить высокое качество и воспроизводимость измерений деформаций. При проектировании такого рода упаковки авторы сформулировали следующие требования: упаковка должна быть пригодна для поверхностного монтажа, т.е. выдерживать суровые условия окружающей среды, а также при монтаже непосредственно в бетон. Авторы использовали технологию 3D-печати фотополимерной смолой. На первом этапе печаталась П-образная подложка, в которую укладывалась волоконная линия, далее П-образная подложка заливалась клеем Duralco. Толщина такой упаковки достигала 5 мм. Далее авторы проводили механические испытания бетонной балки со смонтированными упаковками. По результатам испытаний было принято решение изменения конструкции упаковки. Авторы отдельно печатали П-образную подложку и закрывающую пластину. В П-образную подложку укладывалась волоконная линия, заливалась клеем Duralco и накрывалась закрывающей подложкой. Получена аналогичная по толщине упаковка. Однако исследователи отмечают, что чувствительность ВБР при использовании такой упаковки снизилась. Таким образом, в работе приведено сравнение результатов механических испытаний бетонных балок с различными упаковками. В цитируемой статье отмечается, что оба типа упаковок являются пригодными как для поверхностного монтажа, так и для внедрения в конструкции. Однако второй тип упаковок является более технологичным и прочным, но при этом снижается чувствительность ВОД по сравнению с первым типом упаковок.

На основе литературного обзора можно сделать вывод о том, что в настоящее время разработано большое количество упаковок для ВОД. Однако следует отметить, что большинство из них обладает большой толщиной (3 мм и более) или имеет плохую адгезию к углепластикам. Учитывая эти факты, можно заключить, что применение таких упаковок ВОД для внедрения непосредственно в структуру Smart-конструкции из ПКМ невозможно, поскольку большая толщина приведет к существенному снижению физико-механических характеристик (ФМХ) конструкции, а плохая адгезия не позволит создать прочного соединения слоев ПКМ.

В научно-образовательном центре авиационных композитных технологий (НОЦ АКТ) ПНИПУ изготовлены прототипы упаковок для ВОД (далее упаковка и ВОД называются Smart-слоем) из полиамида по технологии fused deposition modeling (FDM) 3D-печати. Толщина таких упаковок составляет 0,45 мм, а материал, из

которого изготовлен Smart-слой, обладает хорошей адгезией к углепластикам. Однако внедрение Smart-слоев в конструкции из ПКМ эквивалентно внедрению макродефектов, что может существенно повлиять на прочностные и жесткостные характеристики исследуемой конструкции. Таким образом, целью данной работы является проведение расчетных и экспериментальных исследований по оценке механического поведения образцов из ПКМ с внедренным Smart-слоем.

Изготовление Smart-слоя

В последнее время аддитивные технологии, в частности 3D-печать различными пластиками, набирают большую популярность. При этом всё чаще эти технологии находят применение в настольных принтерах. Как правило, при печати используют такие пластики, как PLA, PETG, ABS и др., поскольку эти пластики обладают хорошими механическими характеристиками, легко поддаются механической обработке и позволяют производить печать на принтерах, в которых отсутствует активная подогреваемая камера [26, 27]. Несмотря на высокую популярность 3D-печати, большое количество учёных исследуют возможность применения аддитивных технологий в машиностроении и других областях техники, а также зависимости характеристик получаемых изделий от параметров печати [28].

Однако из универсальности вышеперечисленных полимеров не следует возможность их массового использования в силу ряда недостатков, к которым можно отнести высокую жесткость, малую межслойную прочность, низкую температуру размягчения или хрупкость. Для решения специфических задач, где необходимо избежать этих недостатков, применяются так называемые инженерные пластики: Nylon, POM, PPS, PEEK и т.п.

Одним из наиболее распространённых инженерных пластиков является Nylon или полиамид. Из-за своих свойств полиамид используется в различных областях техники. Так, например, в работе [29] приведено исследование эффективности применения двухкомпонентных гибридных труб из алюминия и нейлона при квазистатическом сжатии. Перед проведением механических испытаний и математического моделирования сжатия гибридных труб авторы приводят диаграмму НДС для алюминия и проводят механические испытания на растяжение напечатанных из nylon образцов. Механические испытания на растяжение проводились на горизонтальных и вертикальных образцах. В первой серии нагрузка прикладывалась вдоль линии укладки пластика, во второй – перпендикулярно. Авторы отмечают, что прочность горизонтальных образцов (нагрузка прикладывалась вдоль линии укладки пластика) несколько выше. Далее авторы печатали одно- и четырехэлементные трубки. Механические испытания на сжатие проводились как на только печатных трубках, так и гибридных. Под одноэлементной гибридной трубой авторы понимают одноэлементную печатную трубу с вставленным алюминиевым стержнем. Под четырехэлементной гибридной трубой авторы понимают алюминиевую

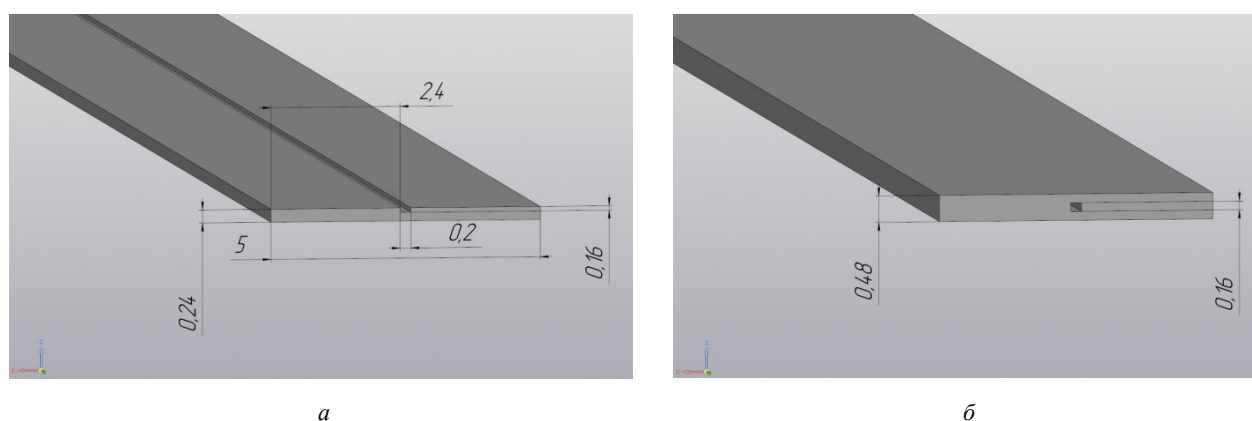


Рис. 1. Схема изготовления Smart-слоя: *а* – печать первой половины слоя, *б* – печать второй половины слоя

Fig. 1. Smart-layer manufacturing scheme: Smart-layer's first half print scheme (*a*); Smart-layer's second half print scheme (*b*)

трубу с вложенной внутрь четырехэлементной печатной трубкой. Отмечается, что механическое поведение труб из чистого нейлона нестабильно. В процессе приложения нагрузки трубы опрокидываются в испытательной машине за счет горизонтального скольжения. Механические испытания гибридных труб показали высокие ФМХ, которые хорошо согласуются с результатами математического моделирования и теоретическими оценками.

В работе [30] исследовали ФМХ и диэлектрическую проницаемость образцов из нейлона, изготовленных по технологии FDM, с различной плотностью заполнения. Анализируя полученные зависимости характеристики диэлектрической проницаемости от плотности заполнения, авторы утверждают, что чем больше плотность заполнения, тем больше диэлектрическая проницаемость. В процессе проведения механических испытаний на растяжение и сжатие получены зависимости НДС для образцов с различной плотностью заполнения. При уменьшении плотности заполнения ФМХ образцов снижаются.

Сравнение ФМХ печатных образцов из PLA, TPU, PA, полученных при проведении механических испытаний на растяжение и сжатие, описано в работе [31]. Наибольшими ФМХ обладают образцы, изготовленные из PLA, предел прочности и модуль упругости у образцов из TPU не удалось определить, поскольку TPU является гиперэластичным эластомером.

Поскольку Smart-слой разрабатывается как для поверхностного мониторинга, так и для непосредственного внедрения в структуру ПКМ, необходимо учитывать температурные режимы изготовления образцов и конструкций из ПКМ (130–180 °С) и использовать материалы, температура плавления которых выше. Кроме того, следует подобрать не только материал, но и технологию изготовления Smart-слоя для обеспечения требуемого расположения волокна и ВБР в слое. Как было показано ранее [16], технология плавления полимерных пленок не может обеспечить требуемое расположение волокна в слое, поэтому было принято решение изготавливать Smart-слои по технологии 3D-печати. В качестве материала для печати выбран полиамид, поскольку внедрение именно полиамида в структуру образцов из ПКМ незначительно изменило ФМХ [32].

3D-печать Smart-слоя происходила в два этапа. На первом этапе была напечатана нижняя половина слоя, содержащая углубление в виде прямоугольной канавки размерами 0,2×0,16 мм, как показано на рис. 1, *а*, в которое помещалось оптическое волокно. На втором этапе, после укладки волокна, программа печати была возобновлена, и напечатана верхняя половина Smart-слоя. На рис. 1, *б*, представлена схема печати второй половины Smart-слоя.

Параметры печати задавались следующим образом: температура подложки 120 °С, температура печати 270 °С, скорость печать 60 мм/с. Изготовленный слой представлен на рис. 2. Для проверки работоспособности слоя после окончания процесса печати к коннектору был подсоединён лазер. Как можно видеть из рис. 2, после изготовления Smart-слоя оптическое волокно осталось целым и сохранило способность к проводимости световой волны.

Известно, что механические характеристики печатных изделий отличаются от литьевого пластика. Эта разница связана с тем, что в процессе печати неизбежно образуются пустоты в местах пересечения или соединения экструдированных нитей. В силу этого для определения механических характеристик печатных деталей необходимо проводить испытания напечатанных образцов, повторяющих схему укладки детали и её режимы печати. К сожалению, в настоящее время не существует нормативной базы, которая регламентирует проведение

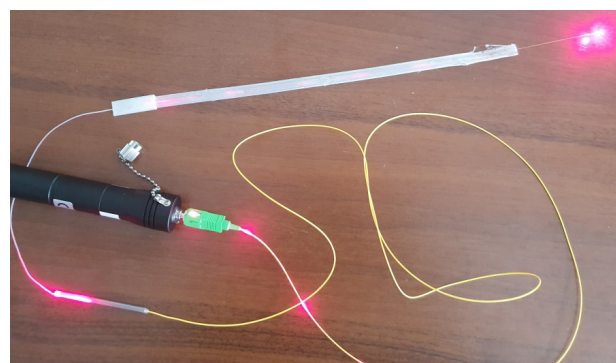


Рис. 2. Изготовленный по технологии 3D-печати Smart-слой

Fig. 2. Smart-layer manufactured by FDM printing technology of nylon

механических испытаний печатных изделий. Однако некоторые авторы предлагают модификации существующих методик механических испытаний [28]. Одним из отличий в проведении испытаний печатных образцов является проведение двух серий испытаний, а именно образцов, напечатанных горизонтально и вертикально. Проведение механических испытаний напечатанных вертикально образцов необходимо для определения межслоевой прочности. Известно, что полиамид – один из немногих материалов для 3D-печати, который обладает изотропией [26].

Таким образом, для получения эффективных характеристик слоя были изготовлены образцы на растяжение, сжатие, изгиб в соответствии с режимом печати Smart-слоя. Напечатанные образцы на растяжение представлены на рис. 3.

Нагружение напечатанных образцов проводилось со скоростью 10 мм/с. Габаритные размеры образцов и параметры испытания регламентируются ГОСТ 11262-2017 (Пластмассы). Поскольку полиамид обладает высокой вязкостью, в ходе проведения механических испытаний на сжатие и изгиб разрушить образцы не удалось, а диаграммы НДС являются неинформативными. Диаграммы НДС, полученные в ходе проведения механических испытаний по растяжению напечатанных образцов, представлены на рис. 4.



Рис. 3. Образцы после 3D-печати

Fig. 3. Samples after 3D-printing

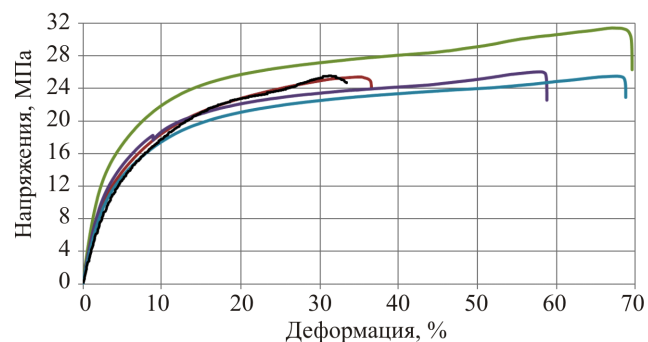


Рис. 4. Диаграммы НДС напечатанных образцов при растяжении

Fig. 4. Deformation diagram of the samples under tension

Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась согласно следующим соотношениям (1)–(3):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \tag{1}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \tag{2}$$

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 (\%), \tag{3}$$

где \bar{x} – среднее значение величины; s – среднеквадратичное отклонение величины; v – коэффициент вариации.

В табл. 1 представлены результаты статистической обработки экспериментальных данных.

Таблица 1

Данные по статистической обработке результатов механических испытаний

Table 1

Data on statistical processing of mechanical test results

Параметр	$E_{рас}$, ГПа	$\sigma_{рас}$, МПа
\bar{x}	0,31	26,82
s	0,02	0,44
v , %	5,26	1,63

Анализируя полученные диаграммы НДС, можно заметить участок пластической деформации, за которой следует упрочнение. Следует отметить, что полученные значения модуля упругости и предела прочности соответствуют 0,31 ГПа и 26,82 МПа и будут использоваться при математическом моделировании соответствующего нагружения в качестве эффективных характеристик пластика.

Проведение механических испытаний

Для проведения механических испытаний на растяжение, сжатие и межслоевой сдвиг были изготовлены образцы из равнопрочного текстильного углепластика. Образцы изготовлены в соответствии с требованиями российских стандартов ГОСТ Р 56785, ГОСТ Р 56812-2015 и международного стандарта ASTM D2344/D2344M-16. Smart-слой укладывался вдоль основы ткани в центр образцов (между 5-м и 6-м слоями для образцов на растяжение/сжатие, 11-м и 12-м для образцов на межслоевой сдвиг). На рис. 5 представлена схема внедрения Smart-слоев в стандартные образцы для проведения механических испытаний.

Исследование влияния внедренного Smart-слоя на физико-механические характеристики образцов из углепластика проводилось на базе Научно-образовательного центра авиационных композитных технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета на универсальной сервогидравлической испытательной машине Zwick/Roell Z 100 (100 kN), входящей в состав уникальной научной установки «Уникальный научно-технологический комплекс

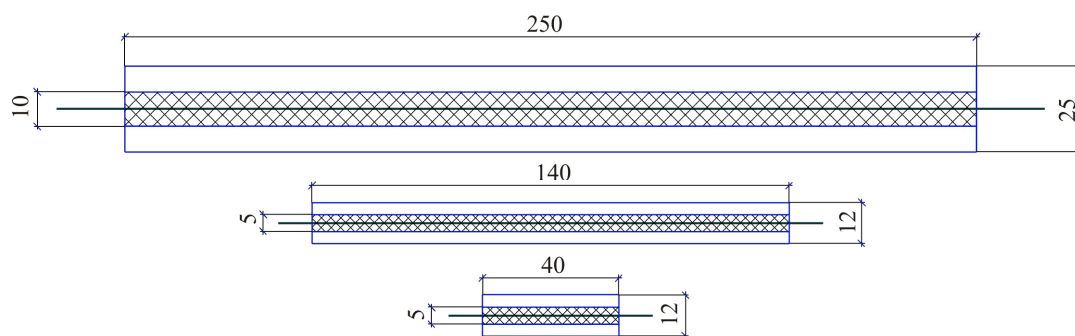


Рис. 5. Схема внедрения Smart-слоёв в стандартные образцы

Fig. 5. Scheme for embedding Smart-layers into standard samples

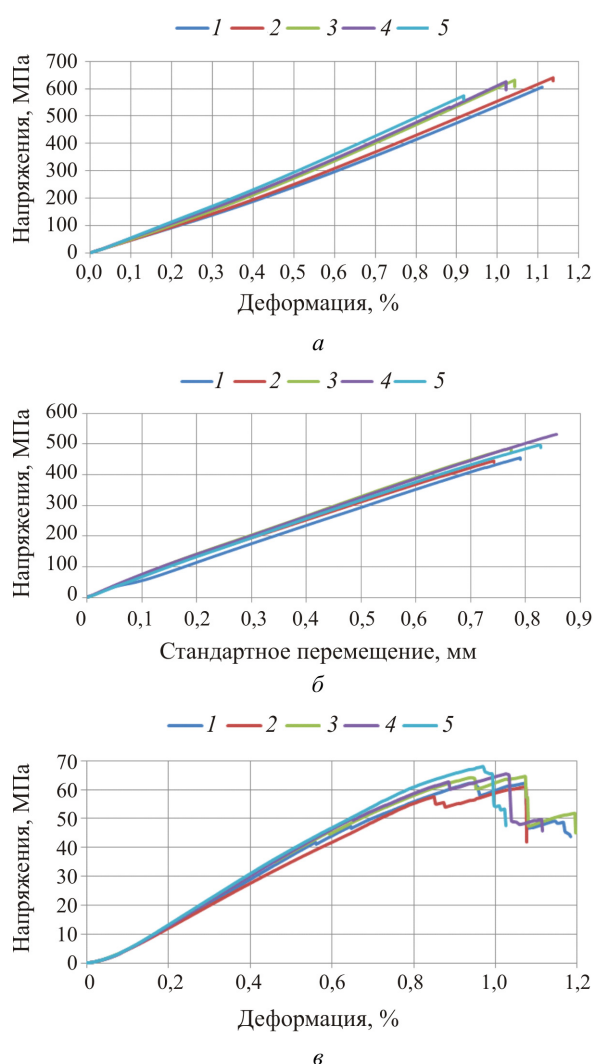


Рис. 6. Диаграммы деформирования образцов:

a – при растяжении, *б* – при сжатии, *в* – при межслоевом сдвиге

Fig. 6. Deformation diagrams of samples: *a* – under tension, *б* – under compression, *в* – under interlayer shear

автоматизированной выкладки». Для обеспечения достоверности результатов экспериментальных исследований для каждой серии испытаний и всех типов нагружения изготовлено по пять образцов. Нагружение осуществлялось до разрушения образцов или падения прикладываемой нагрузки не менее чем на 30 %.

По результатам механических испытаний на растяжение и сжатие определены модули упругости и пределы прочности образцов, предел прочности при межслоевом сдвиге, а также получены соответствующие диаграммы деформирования, которые представлены на рис. 6.

В табл. 2 представлены результаты статистической обработки экспериментальных данных образцов из ПКМ с внедренным печатным Smart-слоем, эталонных образцов и образцов с внедренным Smart-слоем из полиамида (изготовленного по технологии плавления полимерных пленок), полученных в ранних исследованиях [16].

Таблица 2

Данные по статистической обработке результатов механических испытаний

Table 2

Data on statistical processing of mechanical test results

Тип образца		$E_{рас}$	$\sigma_{рас}$	$E_{сж}$	$\sigma_{сж}$	$\sigma_{сд}$
		ГПа	МПа	ГПа	МПа	МПа
Эталонные образцы	\bar{x}	50,2	544	68,9	503,8	64,4
	s	0,5	30,6	1,33	23,9	1,71
	$\nu, \%$	1,01	5,62	1,93	4,47	2,65
Образцы с внедренным Smart-слоем на основе полиамида	\bar{x}	48,70	532,50	71,40	482,00	58,70
	s	0,31	28,20	2,17	28,95	4,31
	$\nu, \%$	0,64	5,29	3,04	6,00	7,34
	Δ	-1,50	-11,50	2,50	-21,80	-5,70
	$\delta, \%$	-2,99	-2,11	3,63	-4,33	-8,85
Образцы с 3D-печатным Smart-слоем	\bar{x}	47,36	615,53	62,59	483,54	64,39
	s	0,89	26,26	1,75	33,98	2,8
	$\nu, \%$	1,88	4,27	2,8	7,03	4,35
	Δ	-2,84	71,53	-6,31	-20,26	-0,01
	$\delta, \%$	-5,66	13,15	-9,16	-4,02	-0,01

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Модули упругости эталонных образцов и образцов с внедренным Smart-слоем, изготовленным по технологии 3D-печати, отличаются не более чем на 10 %.

2. Отклонение предела прочности при межслоевом сдвиге образцов с внедренным Smart-слоем, изготовленным по технологии 3D-печати, составляет 0,01 %, что позволяет говорить о том, что достигается хорошая адгезия между углепластиком и Smart-слоем.

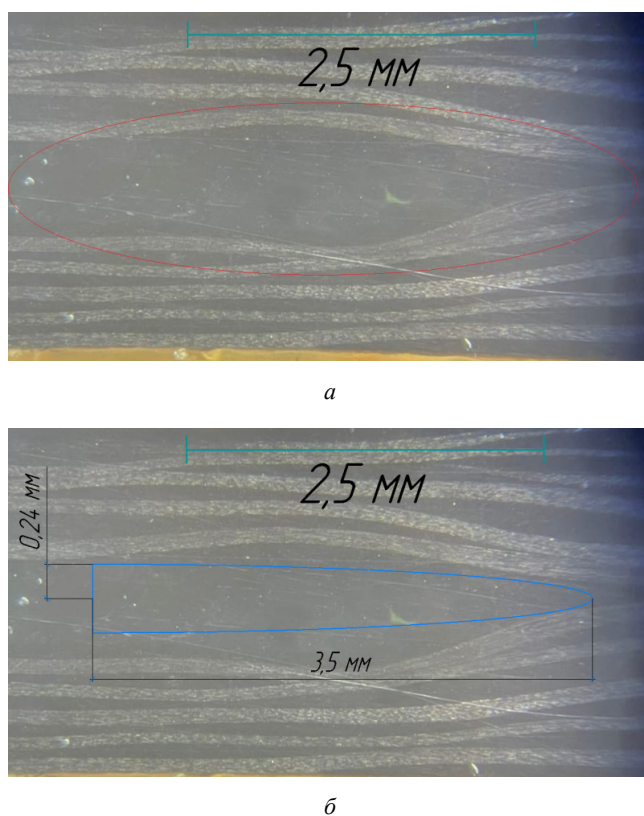


Рис. 7. Карман из эпоксидного связующего (а) и полуэллипс, описывающий смоляной карман (б)

Fig. 7. Pocket made of an epoxy binder and a semi-ellipse describing the resin pocket (b)

3. Предел прочности при растяжении у образцов с внедренным печатным слоем выше, чем у образцов со Smart-слоем из полиамида (изготовленным по технологии плавления полимерных пленок), в то время как пределы прочности при сжатии сопоставимы.

Таким образом, в ходе проведения исследований установлено, что максимальное отклонение по ФМХ составляет не более 15 %, что лежит в рамках разброса ФМХ углепластика в рулоне препрега. Вследствие этого можно сделать вывод, что внедрение таких Smart-слоев несущественно влияет на ФМХ итоговой конструкции из ПКМ. Применение конструкций с внедренными Smart-слоями позволит повысить эффективность их применения и сэкономить ресурсы на проведении планового осмотра методами неразрушающего контроля.

Математическое моделирование механического поведения стандартного образца из ПКМ с внедренным Smart-слоем

На основании экспериментальных данных о физико-механических характеристиках на растяжение и сжатие (относительно эталонных значений) для стандартных образцов из равнопрочного углепластика с внедренным Smart-слоем была разработана математическая модель механического поведения и проведена оценка напряженно-деформированного состояния. Известно,

что в результате технологических особенностей изготовления образцов из ПКМ образуется смоляной карман, который имеет форму острого угла [33]. В этом случае вершины острого угла смоляного кармана являются точками сингулярности решения. Для возможности устранения вышеописанной проблемы авторами принята гипотеза об идеализации формы острого угла смоляного кармана в виде полуэллипсов. С целью качественной оценки формы смоляного кармана были сделаны макрофотографии торца образца после механических испытаний. На рис. 7, а, представлены макроснимки, где красным контуром выделена область смоляного кармана, граничащего со Smart-слоем. На рис. 7, б, приведены количественные оценки величин полуосей полуэллипса.

Величина первой полуоси (равная 0,24 мм) полуэллипса соответствует половине высоты Smart-слоя, это необходимо для возможности согласования формы смоляного кармана, примыкающего к Smart-слою. Величина второй полуоси полуэллипса равна 3,5 мм, что соответствует семи высотам (диаметрам) Smart-слоя. Такая оценка качественно согласуется с приведенной в работе [34].

В качестве расчетной области для исследования механического поведения образца из ПКМ со Smart-слоем рассматривается стандартный образец $25 \times 2,686 \times 250$ мм (см. рис. 5), состоящий из 10 слоев равнопрочного текстильного углепластика, внедренного между 5-м и 6-м слоями Smart-слоя, и смоляного кармана из эпоксидной смолы.

Таким образом, расчетная область представляет собой совокупность трехмерных геометрических моделей, состоящих из 10 слоев равнопрочного текстильного углепластика с толщиной каждого слоя 0,2686 мм, Smart-слоя с шириной 10 мм и высотой 0,48 мм, смоляного кармана, располагаемого по обе стороны от Smart-слоя и представимого в форме полуэллипсов с полуосями 3,5 мм и 0,24 мм. Соответствующая расчетная область представлена на рис. 8.

Для описания математической модели механического поведения стандартного образца из ПКМ со Smart-слоем была выполнена концептуальная постановка, включающая следующую совокупность принятых гипотез:

- образец из ПКМ со Smart-слоем и образовавшимся смоляным карманом рассматривается в трехмерной квазистационарной постановке;

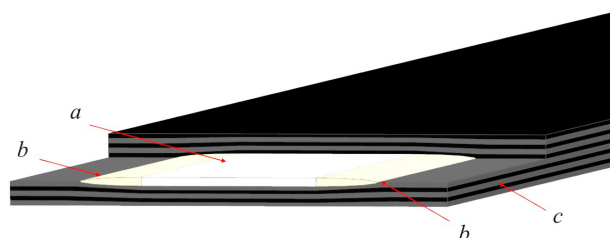


Рис. 8. Расчетная область для исследования механического поведения стандартного образца из ПКМ со Smart-слоем: а – Smart-слой, б – карман из эпоксидного связующего, в – слой углепластика

Fig. 8. Numerical domain for research the mechanical behavior of a standard CFRP sample with a Smart-layer: а – Smart-layer, б – pocket made of an epoxy binder, в – CFRP layers

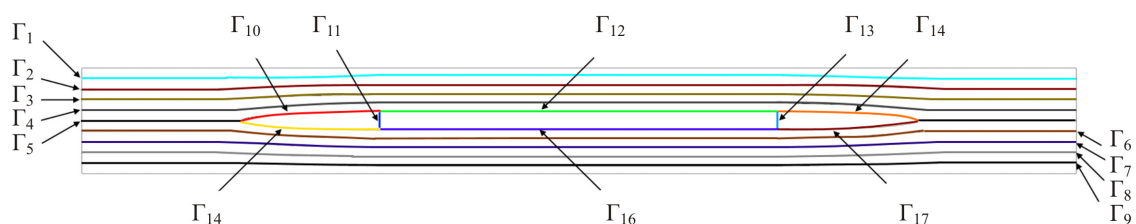


Рис. 9. Схема геометрической области для задания контактного взаимодействия между структурными элементами образца из ПКМ со Smart-слоем

Fig. 9. Geometric area diagram for specifying contact interaction between structural elements of a CFRP sample with a Smart-layer

– напряженно-деформированное состояние образца описывается в приближении линейной теории упругости, поскольку авторами исключается реализация неупругих (пластических) процессов деформирования;

– для каждого слоя углепластика физико-механические характеристики соответствуют трансверсально-изотропному материалу с эффективными модулями равнопрочного углепластика, поскольку не рассматривается внутренняя структура слоя;

– для Smart-слоя физико-механические характеристики соответствуют изотропному материалу с эффективными модулями, представленными в табл. 1;

– для эпоксидного связующего (смоляного кармана) физико-механические характеристики соответствуют изотропному материалу;

– в областях контактов по типу «слой – слой», «слой – Smart-слой», «слой – связующее», «Smart-слой – связующее» реализуется условие идеального контакта, т.е. осуществляется гипотеза о совместности деформаций;

– перемещения образца с одного торца ограничены в области предполагаемых накладок испытательной машины, таким образом реализуется условие «жесткой заделки»;

– для образца с другого торца в области предполагаемых накладок испытательной машины реализуется кинематический способ нагружения в форме перемещений для условий растяжения/сжатия и межслоевого сдвига.

Математическая модель механического поведения образца из ПКМ со Smart-слоем базируется на дифференциальных уравнениях в перемещениях в рамках линейной теории упругости. Для каждого структурного элемента (слои, Smart-слой и эпоксидное связующее) образца принимается малость возможных деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}$, которые описываются в форме градиентов перемещений:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u}_i + \mathbf{u}_i \nabla), \quad i = 1 \dots 13, \quad (4)$$

где \mathbf{u}_i – вектор перемещений i -го структурного элемента образца.

Связь между напряжениями, возникающими в образце, и упругими деформациями описывается определяющим соотношением Гука в конечной форме:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений по Коши; \mathbf{C} – тензор 4-го ранга, включающий упругие константы для каждого из материалов.

Учитывая реализацию совместности деформации для контактируемых структурных элементов образца из ПКМ со Smart-слоем, на рис. 9 представлена графическая схема геометрических областей контактов, где: Γ_1 – контактная поверхность между 1-м и 2-м слоем ПКМ; Γ_2 – контактная поверхность между 2-м и 3-м слоем ПКМ; Γ_3 – контактная поверхность между 3-м и 4-м слоем ПКМ; Γ_4 – контактная поверхность между 4-м и 5-м слоем ПКМ; Γ_5 – контактная поверхность между 5-м и 6-м слоем ПКМ; Γ_6 – контактная поверхность между 6-м и 7-м слоем ПКМ; где Γ_7 – контактная поверхность между 7-м и 8-м слоем ПКМ; Γ_8 – контактная поверхность между 8-м и 9-м слоем ПКМ; Γ_9 – контактная поверхность между 9-м и 10-м слоем ПКМ; Γ_{10} – контактная поверхность между 5-м слоем и эпоксидным связующим; Γ_{11} – контактная поверхность между эпоксидным связующим и Smart-слоем; Γ_{12} – контактная поверхность между 5-м слоем ПКМ и Smart-слоем; Γ_{13} – контактная поверхность между эпоксидным связующим и Smart-слоем; Γ_{14} – контактная поверхность между 5-м слоем ПКМ и эпоксидным связующим; Γ_{15} – контактная поверхность между 6-м слоем ПКМ и эпоксидным связующим; Γ_{16} – контактная поверхность между 6-м слоем ПКМ и Smart-слоем; Γ_{17} – контактная поверхность между 6-м слоем ПКМ и эпоксидным связующим.

Контактное взаимодействие между структурными элементами образца описывается совместностью деформации в следующем виде:

$$\mathbf{u}_i|_{\Gamma_j} = \mathbf{u}_k|_{\Gamma_j}, \quad (6)$$

где i – индекс структурного элемента, расположенного по нормали к поверхности контакта; k – индекс структурного элемента, расположенного против нормали к поверхности контакта; j – индекс контактной поверхности.

Математическая модель (4)–(6) доопределяется начальными и граничными условиями.

В качестве граничных условий принимается следующая система:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_i|_{S_l} = 0, \\ \mathbf{u}_i|_{S_R} = \mathbf{u}_R, \end{cases} \quad (7)$$

где S_1 – поверхность предполагаемых накладок испытательной машины, в области которой реализуются условия жесткой заделки; S_R – поверхность предполагаемых накладок испытательной машины, в области которой реализуется кинематическое нагружение.

Начальные условия описываются положением образца и неизменностью его формы:

$$\mathbf{u}_i = 0. \quad (8)$$

Таким образом, с использованием математической модели (4)–(8) и дальнейшей ее реализацией в среде комплексного инженерного анализа Ansys возможно исследование механического поведения образца из ПКМ со Smart-слоем.

Для проведения вычислительного эксперимента были разработаны сеточные и расчетные модели исследуемого образца из ПКМ со Smart-слоем. Построение расчетных и сеточных моделей осуществлялось с использованием встроенных модулей пакета инженерного анализа Ansys Design Modeler (для импорта геометрических моделей, соответствующих расчетной области), Ansys ICEM CFD (для построения структурированной сетки каждого структурного элемента) и Ansys Static Structural (для настройки расчетной модели под квазистатическое нагружение образца).

Сеточная модель, представляющая собой совокупность структурных элементов образца, представлена на рис. 10.

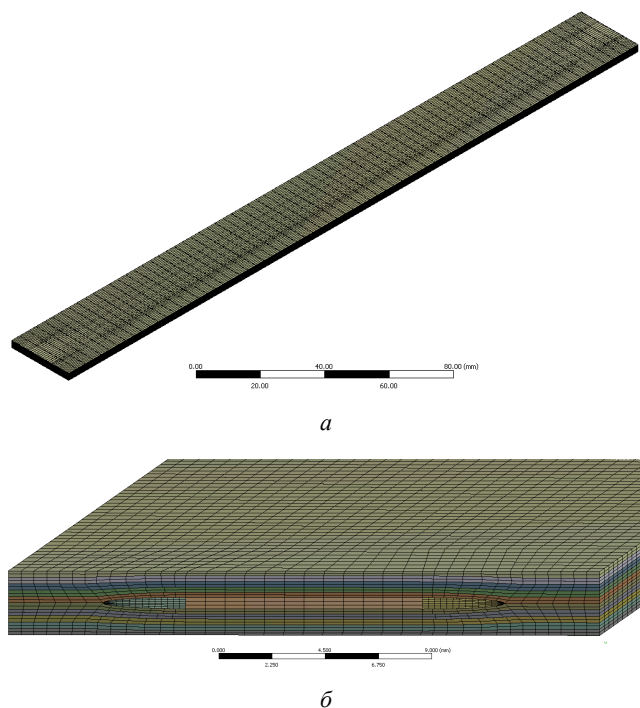


Рис. 10. Общий вид в изометрии (а) и укрупненный вид (б) сеточной модели образца из ПКМ со Smart-слоем и эпоксидным карманом

Fig. 10. General isometric view (a) and enlarged view (b) of a mesh model of a CFRP sample with a Smart-layer and an epoxy pocket

Для расчетной модели генерировалась структурированная и совместная на границах контактов между структурными элементами образца гексагональная конечно-элементная сетка. Размерность конечных элементов подбиралась на основании сеточной сходимости в условиях нагружения (по типу растяжения до 0,3 % с целью снижения временной трудоемкости вычислительного эксперимента). Минимальный характерный размер элемента соответствует 0,05 мм, дальнейшее уменьшение размерности конечных элементов не приводит к увеличению точности получаемых результатов по критерию максимальных нормальных напряжений образца. Общее количество в сеточной модели составило 69 236 конечных элементов.

Выполнен вычислительный эксперимент по оценке напряженно-деформированного состояния стандартного образца из ПКМ со Smart-слоем на одноосное растяжение. В качестве граничного условия задавались перемещения вдоль оси Z, эквивалентные 1 % деформации образца в продольном направлении, что соответствует экспериментальным данным на растяжение.

В табл. 3 приведены физико-механические характеристики для слоев ПКМ из углепластика и эпоксидного связующего. Соответствующие данные для Smart-слоя приведены в табл. 1.

Результаты вычислительного эксперимента по растяжению стандартного образца из ПКМ с внедренным Smart-слоем представлены на рис. 11.

Из анализа полученных результатов по растяжению до 1 % деформаций образца и сопоставления с экспериментальными данными (см. рис. 6, а) можно сделать следующие выводы:

1. Максимальное значение нормальных напряжений по образцу (рис. 11, а) достигает 540,28 МПа в области предполагаемых накладок испытательной машины, что на 1,46 % превышает максимальное значение по статистическому пределу прочности образца. При этом максимальные значения по нормальным напряжениям количественно являются допустимыми в сравнении с полученными результатами по отдельным испытанным образцам (рис. 6, а).

Таблица 3

Механические характеристики материалов, используемые при вычислительном эксперименте образца на растяжение

Table 3

Mechanical characteristics of materials used in the numerical experiment of a sample in tension

Характеристика	Материал	
	углепластик	эпоксидное связующее
E_{11} , ГПа	50	3,78
E_{22} , ГПа	50	
E_{33} , ГПа	6	
G_{12} , ГПа	19,5	1,4
G_{23} , ГПа	3	
G_{13} , ГПа	3	
ν_{12}	0,05	0,35
ν_{23}	0,3	
ν_{13}	0,3	

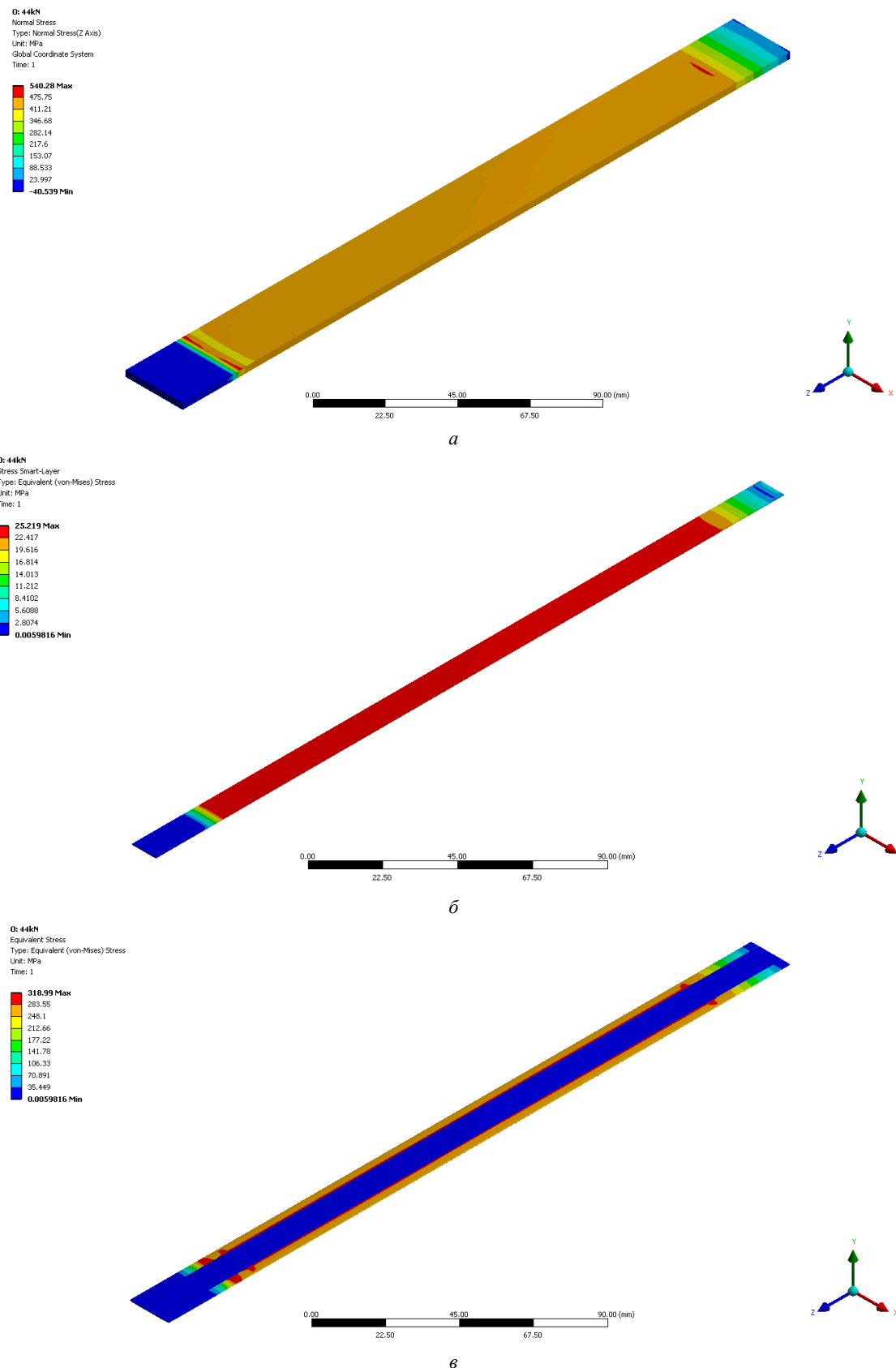


Рис. 11. Результаты математического моделирования по оценке напряженно-деформированного состояния при растяжении образца из ПКМ с внедренным Smart-слоем: *a* – нормальные напряжения по образцу вдоль оси *Z*; *б* – напряжения по Мизесу в Smart-слое; *в* – напряжения по Мизесу в эпоксидном связующем и Smart-слое

Fig. 10. Results of mathematical modeling to assess the stress-strain state under the tension of a PCM sample with an embedded Smart-layer: *a* – normal stresses along the sample along the *Z*-axis; *б* – von Mises stresses in the Smart-layer; *в* – von Mises stresses in epoxy bonding and Smart-layer

2. Максимальные значения напряжений по Мизесу для внедренного Smart-слоя достигают 25,22 МПа, что не превышает значения предельной прочности, полученной в рамках эксперимента на растяжение.

3. Для эпоксидного связующего (рис. 11, в) по результатам моделирования наблюдается существенное превышение предела прочности, на основании которого можно сделать предположение о его разрушении в процессе деформирования, что не противоречит эксперименту.

4. Разработанная математическая модель позволяет в рамках ее применимости качественно и количественно прогнозировать механическое поведение образца из ПКМ с внедренным Smart-слоем и наличием технологических особенностей изготовления.

Заключение

В рамках проведенного исследования изготовлен прототип Smart-слоя по технологии 3D-печати и продемонстрирована его работоспособность. С целью получения эффективных упругих характеристик печатного пластика проведены механические испытания напечатанных образцов. Модуль упругости и предел прочности при растяжении составили 0,31 ГПа и 26,82 МПа соответственно. Полученные при проведении механических испытаний значения модуля упругости и предела прочности использовались при математическом моделировании соответствующего нагружения образца из углепластика.

Для проведения механических испытаний и оценки влияния внедренного Smart-слоя на ФМХ были изготовлены образцы из текстильного равнопрочного углепластика. Полученные при механических испытаниях ФМХ сравнивались с ранее известными [16]. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод,

что внедрение Smart-слоев из полиамида, изготовленных по различным технологиями, не оказывает существенного влияния на физико-механические характеристики углепластика. Максимальное отклонение по ФМХ составляет не более 15 %, что лежит в рамках разброса ФМХ углепластика в рулоне препрега. Применение конструкций с внедренными Smart-слоями позволит повысить их эффективность и экономить ресурсы на проведении планового осмотра методами НМК.

Следует отметить, что Smart-слой, изготовленный по технологии плавления полимерных плёнок, не позволяет точно базировать ВБР и обладает малой эластичностью, что не пригодно для поверхностного монтирования. Smart-слой, изготовленный по технологии 3D-печати, является более технологичным и позволяет решить проблемы с базированием ВБР, а также обладает достаточной эластичностью, вследствие чего процедура приклеивания слоя на поверхность исследуемой конструкции не вызывает сложности.

В рамках математического моделирования механического поведения образца из углепластика с внедренным Smart-слоем явным образом учитывалось наличие смоляного кармана. Проведена качественная оценка формы смоляного кармана, который описывался полуэллипсом. В результате оценки макрофотографий торцов образцов из углепластика определены значения полуосей. Величина первой полуоси эллипса равна 0,24 мм, что соответствует половине высоты Smart-слоя. Значение второй полуоси составляет 3,5 мм и соответственно равно семи высотам Smart-слоя, что в целом удовлетворяет известным оценкам. Максимальное значение нормальных напряжений в образце достигает 540,28 МПа в области предполагаемых накладок испытательной машины, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в рамках данного исследования.

Библиографический список

1. Han T., Wu G., Lu Y. Crack monitoring using short-gauged Brillouin fiber optic sensor // Measurement. – Elsevier Ltd, 2021. – Vol. 179. – P. 1–13.
2. Tserpes K.I., Karachalios V., Giannopoulos I., Prentzas V., Ruzek R. Strain and damage monitoring in CFRP fuselage panels using fiber Bragg grating sensors. Part I: Design, manufacturing and impact testing // Compos Struct. – 2014. – Vol. 107. – P. 726–736.
3. Yu F., Okabe Y. Linear damage localization in CFRP laminates using one single fiber-optic Bragg grating acoustic emission sensor // Compos Struct. – Elsevier, 2020. – Vol. 238. – P. 1–10.
4. Anoshkin A.N., Barkanov E., Pisarev P.V. Calculation and experimental research of the mechanical deformation of a helicopter blade made of composite materials with embedded piezoactuators // AIP Conf Proc. – 2020. – Vol. 2310. – P. 1–4.
5. Alvarez-Montoya J., Carvajal-Castrillón A., Sierra-Pérez J. In-flight and wireless damage detection in a UAV composite wing using fiber optic sensors and strain field pattern recognition // Mech Syst Signal Process. – Elsevier Ltd, 2020. – Vol. 136. – P. 1–26.

6. A review on structural health monitoring of railroad track structures using fiber optic sensors / D. Sasi, S. Philip, R. David, J. Swathi // Mater Today Proc. – Elsevier Ltd., 2020. – Vol. 33. – P. 3787–3793.
7. Longitudinal force measurement in continuous welded rail with bi-directional FBG strain sensors / P. Wang, K. Xie, L. Shao, L. Yan, J. Xu, R. Chen // Smart Mater Struct. – IOP Publishing, 2015. – Vol. 25, № 1. – P. 1–10.
8. Distributed fiber optic sensors for the monitoring of a tunnel crossing a landslide / A. Minardo, E. Catalano, A. Coscetta, G. Zeni, L. Zhang, C. Di Maio, R. Vassallo, R. Coviello, G. Macchia, L. Picarelli, L. Zeni // Remote Sens. – 2018. – Vol. 10, № 8. – P. 2–9.
9. Commissioning and evaluation of a fiber-optic sensor system for bridge monitoring / R.H. Scott, P. Banerji, S. Chikermane, S. Srinivasan, P.A.M. Basheer, F. Surre, T. Sun, K.T.V. Grattan // IEEE Sens J. – 2013. – Vol. 13, № 7. – P. 2555–2562.
10. Fiber optic sensors enabled monitoring of thermal curling of concrete pavement slab: Temperature, strain and inclination /

W. Liao, Y. Zhuang, C. Zeng, W. Deng, J. Huang, H. Ma // Meas J Int Meas Confed. – Elsevier Ltd, 2020. – Vol. 165. – P. 1–12.

11. Structural health monitoring in composite structures by fiber-optic sensors / A. Güemes, A. Fernández-López, P.F. Díaz-Maroto, A. Lozano, J. Sierra-Perez // Sensors (Switzerland). – 2018. – Vol. 18, № 4. – P. 1–11.

12. Embedded fiber Bragg grating sensor – based wing load monitoring system for composite aircraft / H. Kwon, Y. Park, J.H. Kim, C.G. Kim // Struct Heal Monit. – 2019. – Vol. 18, № 4. – P. 1337–1351.

13. Experimental investigations in embedded sensing of composite components in aerospace vehicles / A. Ghoshal, J. Ayers, M. Gurvich, M. Urban, N. Bordick // Compos Part B Eng. – Elsevier Ltd, 2015. – Vol. 71. – P. 52–62.

14. Cure monitoring and structural health monitoring of composites using micro-braided distributed optical fibre / O. Rufai, N. Chandarana, M. Gautam, P. Pofluri, M. Gresil // Compos Struct. – Elsevier Ltd, 2020. – Vol. 254. – P. 1–9.

15. Development of low cost packaged fibre optic sensors for use in reinforced concrete structures / R.H. Scott, S. Chikermane, M. Vidakovic, B. McKinley, T. Sun, P. Banerji, K.T.V. Grattan // Meas J Int Meas Confed. – Elsevier Ltd, 2019. – Vol. 135. – P. 617–624.

16. Study smart-layer effect on the physical and mechanical characteristics of the samples from polymer composite materials under quasi-static loading / G.S. Shipunov, M.A. Baranov, A.S. Nikiforov, D.V. Golovin, A.A. Tihonova // PNRPU Mech Bull. – 2020. – Vol. 2020, № 4. – P. 188–200.

17. Creation of a SMART Layer prototype with fiber-optic sensors for monitoring the stress-strain state of structures fabricated from polymeric composite materials and an estimation of its technical characteristics / G.S. Shipunov, M.A. Baranov, A.S. Nikiforov, A.A. Tikhonova, V.M. Osokin, A.A. Tret'yakov // J Opt Technol. – 2021. – Vol. 88, № 4. – P. 209–214.

18. Advances in the development of built-in diagnostic system for filament wound composite structures / X.P. Qing, S.J. Beard, A. Kumar, H.L. Chan, R. Ikegami // Compos Sci Technol. – 2006. – Vol. 66, № 11–12. – P. 1694–1702.

19. Impact source identification in a carbon fiber reinforced polymer plate by using embedded fiber optic acoustic emission sensors / T. Fu, Y. Liu, K.T. Lau, J. Leng // Compos Part B Eng. – Elsevier Ltd, 2014. – Vol. 66. – P. 420–429.

20. Embedded fiber-optic sensing for accurate internal monitoring of cell state in advanced battery management systems part 1: Cell embedding method and performance / A. Raghavan, P. Kiesel, L.W. Sommer, J. Schwartz, A. Lochbaum, A. Hegyi, A. Schuh, K. Arakaki, B. Saha, A. Ganguli, K.H. Kim, C.A. Kim, H.J. Hah, S.K. Kim, G.O. Hwang, G.C. Chung, B. Choi, M. Alamgir // J Power Sources. – Elsevier B.V, 2017. – Vol. 341. – P. 466–473.

21. Das S., Saha P. A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures // Meas J Int Meas Confed. – Elsevier, 2018. – Vol. 129, № July. – P. 68–90.

22. Anastasopoulos D., De Roeck G., Reynders E.P.B. One-year operational modal analysis of a steel bridge from high-

resolution macrostrain monitoring: Influence of temperature vs. retrofitting // Mech Syst Signal Process. – Elsevier Ltd, 2021. – Vol. 161. – P. 107951.

23. Han T., Wu G., Lu Y. Crack monitoring using short-gauged Brillouin fiber optic sensor // Meas J Int Meas Confed. – Elsevier Ltd, 2021. – Vol. 179. – P. 1–13.

24. Real-time monitoring for the CFRP/aluminium-alloy bonding structure during curing process using encapsulated fiber Bragg grating sensor / J. Huang, J. Zeng, Y. Bai, Y. Wang, K. Wang, X. Wu, Z. Cheng, D. Liang // Opt Fiber Technol. – Elsevier, 2020. – Vol. 57, № November 2019. – P. 102216.

25. Real-Time Distributed Strain Monitoring of a Railway Bridge during Train Passage by Using a Distributed Optical Fiber Sensor Based on Brillouin Optical Correlation Domain Analysis / H.J. Yoon, K.Y. Song, C. Choi, H.S. Na, J.S. Kim // J Sensors. – 2016. – Vol. 2016. – P. 1–10.

26. Leveraging 3D printing to enhance mass spectrometry: A review / M. Grajewski, M. Hermann, R.D. Oleschuk, E. Verpoorte, G.I. Salentijn // Anal Chim Acta. – Elsevier Ltd, 2021. – Vol. 1166. – P. 338332.

27. A short review on 3D printing methods, process parameters and materials / M.M. Prabhakar, A.K. Saravanan, A.H. Lenin, I.J. Leno, K. Mayandi, P.S. Ramalingam // Mater Today Proc. – Elsevier Ltd, 2020. – Vol. 45, № November. – P. 6108–6114.

28. Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process / V.E. Kuznetsov, A.N. Solonin, O.D. Urzhumtsev, R. Schilling, A.G. Tavítov // Polymers (Basel). – 2018. – Vol. 10, № 3.

29. Fu X., Zhang X., Huang Z. Axial crushing of Nylon and Al/Nylon hybrid tubes by FDM 3D printing // Compos Struct. – Elsevier Ltd, 2021. – Vol. 256, № September 2020. – P. 113055.

30. Investigation on electrical and mechanical properties of 3D printed nylon 6 for RF/microwave electronics applications / S. Aslanzadeh, H. Saghlatoon, M.M. Honari, R. Mirzavand, C. Montemagno, P. Mousavi // Addit Manuf. – Elsevier, 2018. – Vol. 21, № December 2017. – P. 69–75.

31. Johnston R., Kazancı Z. Analysis of additively manufactured (3D printed) dual-material auxetic structures under compression // Addit Manuf. – Elsevier B.V., 2021. – Vol. 38, № September 2020. – P. 101783.

32. Numerical and experimental studies of the mechanical behavior of samples equipped with a sensor layer under quasi-static loads / G.S. Shipunov, M.A. Baranov, A.A. Tihonova, A.S. Nikiforov, D.V. Golovin, A.V. Truhtanov // 29Th Russ Conf Math Model Nat Sci. – 2021. – Vol. 2371. – P. 1–5.

33. Finite element prediction of resin pocket geometries around arbitrary inclusions in composites: Case study for an embedded optical fiber interrogator / N. Lammens, G. Luyckx, W. Van Paepegem, J. Degrieck // Compos Struct. – Elsevier Ltd, 2016. – Vol. 146. – P. 95–107.

34. Кошелева Н.А., Сероваев Г.С. Моделирование напряженного состояния в окрестности встроенного в полимерный композиционный материал оптического волокна с учетом структурных особенностей композита // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 466–473.

References

1. Han T., Wu G., Lu Y. Crack monitoring using short-gauged Brillouin fiber optic sensor. *Measurement, Elsevier Ltd*, 2021, vol. 179, pp. 1-13.
2. Tserpes K.I., Karachalios V., Giannopoulos I., Prentzas V., Ruzek R. Strain and damage monitoring in CFRP fuselage panels using fiber Bragg grating sensors. Part I: Design, manufacturing and impact testing. *Compos Struct*, 2014, vol. 107, pp. 726-736.
3. Yu F., Okabe Y. Linear damage localization in CFRP laminates using one single fiber-optic Bragg grating acoustic emission sensor. *Compos Struct, Elsevier*, 2020, vol. 238, pp. 1-10.
4. Anoshkin A.N., Barkanov E., Pisarev P.V. Calculation and experimental research of the mechanical deformation of a helicopter blade made of composite materials with embedded piezoactuators. *AIP Conf Proc*, 2020, vol. 2310, pp. 1-4.
5. Alvarez-Montoya J., Carvajal-Castrillón A., Sierra-Pérez J. In-flight and wireless damage detection in a UAV composite wing using fiber optic sensors and strain field pattern recognition. *Mech Syst Signal Process, Elsevier Ltd*, 2020, vol. 136, pp. 1-26.
6. Sasi D., Philip S., David R., Swathi J. A review on structural health monitoring of railroad track structures using fiber optic sensors. *Mater Today Proc, Elsevier Ltd.*, 2020, vol. 33, pp. 3787-3793.
7. Wang P., Xie K., Shao L., Yan L., Xu J., Chen R. Longitudinal force measurement in continuous welded rail with bi-directional FBG strain sensors. *Smart Mater Struct, IOP Publishing*, 2015, vol. 25, no. 1, pp. 1-10.
8. Minardo A., Catalano E., Coscetta A., Zeni G., Zhang L., Di Maio C., Vassallo R., Coviello R., Macchia G., Picarelli L., Zeni L. Distributed fiber optic sensors for the monitoring of a tunnel crossing a landslide. *Remote Sens*, 2018, vol. 10, no. 8, pp. 2-9.
9. Scott R.H., Banerji P., Chikermane S., Srinivasan S., Basheer P.A.M., Surre F., Sun T., Grattan K.T.V. Commissioning and evaluation of a fiber-optic sensor system for bridge monitoring. *IEEE Sens J*, 2013, vol. 13, no. 7, pp. 2555-2562.
10. Liao W., Zhuang Y., Zeng C., Deng W., Huang J., Ma H. Fiber optic sensors enabled monitoring of thermal curling of concrete pavement slab: Temperature, strain and inclination. *Meas J Int Meas Confed, Elsevier Ltd*, 2020, vol. 165, pp. 1-12.
11. Güemes A., Fernández-López A., Díaz-Maroto P.F., Lozano A., Sierra-Perez J. Structural health monitoring in composite structures by fiber-optic sensors. *Sensors (Switzerland)*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 1-11.
12. Kwon H., Park Y., Kim J.H., Kim C.G. Embedded fiber Bragg grating sensor-based wing load monitoring system for composite aircraft. *Struct Heal Monit*, 2019, vol. 18, no. 4, pp. 1337-1351.
13. Ghoshal A., Ayers J., Gurvich M., Urban M., Bordick N. Experimental investigations in embedded sensing of composite components in aerospace vehicles. *Compos Part B Eng, Elsevier Ltd*, 2015, vol. 71, pp. 52-62.
14. Rufai O., Chandarana N., Gautam M., Potluri P., Gresil M. Cure monitoring and structural health monitoring of composites using micro-braided distributed optical fibre. *Compos Struct, Elsevier Ltd*, 2020, vol. 254, pp. 1-9.
15. Scott R.H., Chikermane S., Vidakovic M., McKinley B., Sun T., Banerji P., Grattan K.T.V. Development of low cost packaged fibre optic sensors for use in reinforced concrete structures. *Meas J Int Meas Confed, Elsevier Ltd*, 2019, vol. 135, pp. 617-624.
16. Shipunov G.S., Baranov M.A., Nikiforov A.S., Golovin D.V., Tihonova A.A. Study smart-layer effect on the physical and mechanical characteristics of the samples from polymer composite materials under quasi-static loading. *PNRPU Mech Bull*, 2020, vol. 2020, no. 4, pp. 188-200.
17. Shipunov G.S., Baranov M.A., Nikiforov A.S., Tikhonova A.A., Osokin V.M., Tret'yakov A.A. Creation of a SMART Layer prototype with fiber-optic sensors for monitoring the stress-strain state of structures fabricated from polymeric composite materials and an estimation of its technical characteristics. *J Opt Technol*, 2021, vol. 88, no. 4, pp. 209-214.
18. Qing X.P., Beard S.J., Kumar A., Chan H.L., Ikegami R. Advances in the development of built-in diagnostic system for filament wound composite structures. *Compos Sci Technol*, 2006, vol. 66, no. 11-12, pp. 1694-1702.
19. Fu T., Liu Y., Lau K.T., Leng J. Impact source identification in a carbon fiber reinforced polymer plate by using embedded fiber optic acoustic emission sensors. *Compos Part B Eng, Elsevier Ltd*, 2014, vol. 66, pp. 420-429.
20. Raghavan A., Kiesel P., Sommer L.W., Schwartz J., Lochbaum A., Hegyi A., Schuh A., Arakaki K., Saha B., Ganguli A., Kim K.H., Kim C.A., Hah H.J., Kim S.K., Hwang G.O., Chung G.C., Choi B., Alamgir M. Embedded fiber-optic sensing for accurate internal monitoring of cell state in advanced battery management systems part 1: Cell embedding method and performance. *J Power Sources, Elsevier B.V.*, 2017, vol. 341, pp. 466-473.
21. Das S., Saha P. A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures. *Meas J Int Meas Confed, Elsevier*, 2018, vol. 129, no. July, pp. 68-90.
22. Anastasopoulos D., De Roeck G., Reynders E.P.B. One-year operational modal analysis of a steel bridge from high-resolution macrostrain monitoring: Influence of temperature vs. retrofitting. *Mech Syst Signal Process, Elsevier Ltd*, 2021, vol. 161, pp. 107951.
23. Han T., Wu G., Lu Y. Crack monitoring using short-gauged Brillouin fiber optic sensor. *Meas J Int Meas Confed, Elsevier Ltd*, 2021, vol. 179, pp. 1-13.
24. Huang J., Zeng J., Bai Y., Wang Y., Wang K., Wu X., Cheng Z., Liang D. Real-time monitoring for the CFRP/aluminium-alloy bonding structure during curing process using encapsulated fiber Bragg grating sensor. *Opt Fiber Technol, Elsevier*, 2020, vol. 57, no. November 2019, pp. 102216.
25. Yoon H.J., Song K.Y., Choi C., Na H.S., Kim J.S. Real-Time Distributed Strain Monitoring of a Railway Bridge during Train Passage by Using a Distributed Optical Fiber Sensor Based on Brillouin Optical Correlation Domain Analysis. *J Sensors*, 2016, vol. 2016, pp. 1-10.
26. Grajewski M., Hermann M., Oleschuk R.D., Verpoorte E., Salentijn G.I. Leveraging 3D printing to enhance mass spectrometry: A review. *Anal Chim Acta, Elsevier Ltd*, 2021, vol. 1166, pp. 338332.
27. Prabhakar M.M., Saravanan A.K., Lenin A.H., Leno I.J., Mayandi K., Ramalingam P.S. A short review on 3D printing methods, process parameters and materials. *Mater Today Proc, Elsevier Ltd*, 2020, vol. 45, no. November, pp. 6108-6114.
28. Kuznetsov V.E., Solonin A.N., Urzhumtsev O.D., Schilling R., Tavtiov A.G. Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process. *Polymers (Basel)*, 2018, vol. 10, no. 3.
29. Fu X., Zhang X., Huang Z. Axial crushing of Nylon and Al/Nylon hybrid tubes by FDM 3D printing. *Compos Struct, Elsevier Ltd*, 2021, vol. 256, no. September 2020, pp. 113055.

30. Aslanzadeh S., Saghlatoon H., Honari M.M., Mirzavand R., Montemagno C., Mousavi P. Investigation on electrical and mechanical properties of 3D printed nylon 6 for RF/microwave electronics applications. *Addit Manuf, Elsevier*, 2018, vol. 21, no. December 2017, pp. 69-75.

31. Johnston R., Kazancı Z. Analysis of additively manufactured (3D printed) dual-material auxetic structures under compression. *Addit Manuf, Elsevier B.V.*, 2021, vol. 38, no. September 2020, pp. 101783.

32. Shipunov G.S., Baranov M.A., Tihonova A.A., Nikiforov A.S., Golovin D.V., Truhtanov A.V. Numerical and experimental studies of the mechanical behavior of samples equipped with a sensor layer under

quasi-static loads. *29Th Russ Conf Math Model Nat Sci*, 2021, vol. 2371, pp. 1-5.

33. Lammens N., Luyckx G., Van Paepegem W., Degrieck J. Finite element prediction of resin pocket geometries around arbitrary inclusions in composites: Case study for an embedded optical fiber interrogator. *Compos Struct, Elsevier Ltd*, 2016, vol. 146, pp. 95-107.

34. Kosheleva N.A., Serovaev G.S. Stress-state modeling in the vicinity of an optical fiber embedded into polymer composite material taking into account the structural features of the composite. *Computational Mechanics of Continuous Media*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 466-473.

Финансирование. Благодарность. Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2020-0026).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Funding. Acknowledgment. The results were obtained in the course of fulfilling the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of fundamental scientific research (project No. FSNM-2020-0026).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.