



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

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



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.16

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ SMART-СЛОЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Г.С. Шипунов, М.А. Баранов, А.С. Никифоров, Д.В. Головин, А.А. Тихонова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 20 октября 2020 г.
Принята: 20 ноября 2020 г.
Опубликована: 30 декабря 2020 г.

Ключевые слова:

волоконно-оптические датчики, Smart-слой, напряженно-деформированное состояние, физико-механические характеристики, квазистатическое нагружение, система мониторинга состояния конструкции, полимерные композиционные материалы, разрушение, жесткость, прочность.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время актуальны разработка и использование Smart-конструкций, которые в режиме реального времени позволяют следить за изменением требуемых величин. Smart-конструкции нашли широкое применение в строительной, автомобильной и аэрокосмической отрасли. Технологии создания изделий из полимерных композиционных материалов позволяют внедрять различные датчики непосредственно в структуру материала, тем самым создавая системы мониторинга состояния конструкции. Наиболее перспективными для такого внедрения являются волоконно-оптические датчики, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с другими датчиками (люминесцентными, тензодатчиками, пьезоэлементами) Однако при внедрении волоконно-оптических датчиков возникает ряд сложностей, в первую очередь связанных с хрупкостью оптоволокна, что приводит к слою оптоволоконных линий. Вследствие этого необходима разработка Smart-слоя, который позволит защитить выводы оптического волокна и не приведет к существенному изменению физико-механических характеристик.

В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с определением жесткостных и прочностных характеристик образцов из полимерных композиционных материалов: эталонных образцов, образцов с внедренными волоконно-оптическими датчиками, образцов с внедренными Smart-слоями. Разработанный Smart-слой состоит из полимерного материала и встроенного в него оптического волокна с решеткой Брэгга. Такой слой позволяет защитить оптическое волокно от механических повреждений и осуществить безопасное внедрение в конструкции из композиционных материалов. В работе рассмотрены следующие конфигурации Smart-слоя: полимерная армированная сетка, полиамидный и полиуретановый слой. Представлено сравнение и анализ влияния внедренного оптического волокна и различных конфигураций Smart-слоя в структуру композита на физико-механические характеристики образцов, полученные при квазистатическом нагружении (растяжении, сжатии, межслоевом сдвиге).

Для более детального анализа влияния внедренных волоконно-оптических датчиков и различных конфигураций Smart-слоя проведено численное моделирование соответствующих нагружений образцов для оценки их механического поведения. На основе полученных физико-механических характеристик выбрана и обоснована конкретная конфигурация Smart-слоя для проведения дальнейших исследований.

© ПНИПУ

© Шипунов Глеб Сергеевич – к.т.н., доц., e-mail: gsshipunov@gmail.com, ID: [0000-0002-2322-1872](https://orcid.org/0000-0002-2322-1872)
Баранов Максим Алексеевич – асп., e-mail: maximbaranov.123@gmail.com, ID: [0000-0002-5600-1526](https://orcid.org/0000-0002-5600-1526)
Никифоров Александр Сергеевич – асп., e-mail: aleksandr.niciforov@gmail.com, ID: [0000-0001-5360-2484](https://orcid.org/0000-0001-5360-2484)
Головин Данила Вячеславович – асп., e-mail: danilagolovin@gmail.com, ID: [0000-0001-6617-7237](https://orcid.org/0000-0001-6617-7237)
Тихонова Александра Алексеевна – асп., e-mail: tikaleksandra@yandex.ru, ID: [0000-0003-2230-7022](https://orcid.org/0000-0003-2230-7022)

Gleb S. Shipunov – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: gsshipunov@gmail.com, ID: [0000-0002-2322-1872](https://orcid.org/0000-0002-2322-1872)
Maksim A. Baranov – PhD Student, e-mail: maximbaranov.123@gmail.com, ID: [0000-0002-5600-1526](https://orcid.org/0000-0002-5600-1526)
Aleksandr S. Nikiforov – PhD Student, e-mail: aleksandr.niciforov@gmail.com, ID: [0000-0001-5360-2484](https://orcid.org/0000-0001-5360-2484)
Danila V. Golovin – PhD Student, e-mail: danilagolovin@gmail.com, ID: [0000-0001-6617-7237](https://orcid.org/0000-0001-6617-7237)
Aleksandra A. Tihonova – PhD Student, e-mail: tikaleksandra@yandex.ru, ID: [0000-0003-2230-7022](https://orcid.org/0000-0003-2230-7022)



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)

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

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 October 2020
Accepted: 20 November 2020
Published: 30 December 2020

Keywords:

fiber-optic sensors, Smart-layer, stress-strain state, physical and mechanical characteristics, quasi-static loading, system for monitoring the state of a structure, polymer composite materials, fracture, stiffness, strength.

ABSTRACT

Currently, developments of the so-called Smart-constructions are relevant as they enable a real-time monitoring of changes in required values. Smart designs are widely used in the construction, automotive and aerospace industries. Technologies of creating products from polymer composite materials make it possible to introduce various sensors directly into the structure of a material, thereby create systems monitoring the state of structures. The most recommended for such implementation are fiber-optic sensors, which have a number of advantages over other sensors (luminescent, strain gauge, piezoelectric ones). However, when introducing the fiber-optic sensors, there is a number of difficulties, which are primarily associated with fragility of the optical fiber and lead to the breakdown of fiber-optic lines. As a result, it is necessary to develop a Smart-layer that will protect the optical fiber leads and will not significantly change the physical and mechanical characteristics.

This paper aims to determine the stiffness and strength characteristics of samples made of polymer composite materials: reference samples, samples with embedded fiber-optic sensors, samples with embedded Smart-layers. In this work, a Smart-layer is understood as a coating that protects the fiber-optic sensors at the stage of implementation into a structure. The paper considers the following configurations of the Smart-layer: polymer reinforced mesh, polyamide and polyurethane layer. We analyzed and compared the influence of the embedded optical fiber and various configurations of the Smart-layer in the composite structure on the physicomaterial characteristics of the samples obtained under quasi-static loading (tension, compression, and interlayer shear).

For a more detailed analysis of using the fiber-optic sensors and various configurations of the Smart-layer, the corresponding loads were simulated to assess their mechanical behavior. Based on the obtained physical and mechanical characteristics, a specific configuration of the Smart-layer was selected and justified for further researches.

© PNRPU

Введение

В настоящее время при эксплуатации конструкций авиационной техники из полимерных композиционных материалов (ПКМ) особое внимание необходимо уделить вопросам, связанным с безопасностью и надежностью таких конструкций [1, 2]. Для удовлетворения требований по надежности, предъявляемых к композитным конструкциям, проводится плановый осмотр, который зачастую является дорогостоящим и приводит к полной остановке эксплуатации, снятию конструкции с последующей транспортировкой в лаборатории неразрушающего контроля [3, 4]. Неразрушающий контроль проводится, как правило, ультразвуковыми, тепловыми и радиационными методами контроля в зависимости от формы и размеров конструкции [5, 6]. Для экономии времени и финансов актуальным и перспективным является создание систем мониторинга состояния конструкций, которые в режиме реального времени позволяют получать информацию о напряженно-деформированном состоянии (НДС) и изменении температурных полей в процессе эксплуатации конструкций.

Научно-исследовательские разработки в области создания новых материалов привели к созданию Smart-материалов. В основе таких материалов лежат сети рас-

пределенных датчиков, которые могут быть расположены на поверхности или встроены в композиционные конструкции, образуя Smart-слой [7–9]. Такой слой способен фиксировать необходимые параметры с помощью сенсоров, изменять геометрию с помощью актуаторов и обрабатывать соответствующую информацию. Возможность изготовления этих сенсорных слоев в различных формах повышает их универсальность и увеличивает шансы возможных применений для мониторинга состояния конструкции в режиме реального времени.

Высокой популярностью в последнее время пользуются волоконно-оптические датчики (ВОД) на основе решеток Брэгга. Это обусловлено тем, что оптические волокна достаточно гибкие, прочные, термостойкие и могут быть легко встроены в многослойные композиты [10, 11]. Наряду с этим такие датчики обладают достаточно малым размером (диаметр оптического волокна, как правило, лежит в диапазоне от 0,18 до 0,22 мм), что позволяет производить их внедрение в различные конструкции без снижения физико-механических характеристик (ФМХ) [12]. Использование таких систем мониторинга на основе ВОД может обеспечить контрольные точки для оценки состояния конструкции и служить отправной точкой для ее дальнейшего технического обслуживания, что позволяет снизить затраты и предот-

вратить разрушение [13]. По данным, получаемым при мониторинге с ВОД, можно судить о состоянии конструкции, работоспособности и ресурсе.

В настоящее время волоконно-оптические датчики широко применяются в различных авиационных конструкциях [14]. Например, в работе [15] 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. Мониторинг усталостных трещин металлических фюзеляжей вертолетов при помощи сети оптоволоконных датчиков на брэгговских решетках описывается в работе [16]. В [17] рассмотрено практическое применение ВОД для структурного мониторинга таких объектов, как турбовинтовые самолеты и парусные яхты. Оптоволоконные датчики были встроены в 35-метровую углеродистую мачту яхты, а в самолете Jetstream они были установлены на поверхности крыла. Данные с ВОД, установленных на самолете, получены в режиме реального времени при полете в экстремальных условиях. В работе [18] датчики встроены внутрь крыла самолета. В цитируемой работе описывается использование ВОД на брэгговских решетках для измерения в реальном времени динамически изменяющихся деформаций при испытаниях крыла в аэродинамической трубе. Показания ВОД сравнивались с двумя типами сенсоров, также внедренными в крыло, электрическим тензодатчиком и пьезоэлектрическим датчиком. При стендовых испытаниях наблюдалась хорошая сходимость всех трех систем. В работе [19] описан процесс внедрения 20 ВОД в лонжерон беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Авторами описан процесс разработки и создания дистанционной системы передачи данных с ВОД, которая смонтирована на борту БПЛА, приведено описание летных испытаний, в ходе которых данные с ВОД были переданы и расшифрованы на земле.

Оптоволоконные датчики на брэгговских решетках применяются при контроле состояния ветровых генераторов [20, 21], мониторинге работоспособности геотехнических объектов [22–24], а также для гражданских структур, таких как высотные здания, мосты, тоннели. Авторами работы [25] исследуется поведение 40 ВОД, встроенных в полимерный композитный дорожный мост. Авторы изучили возможность получения данных о температуре и деформации в режиме реального времени.

При оснащении на поверхности или внедрении непосредственно в конструкцию ВОД основной целью мониторинга является предоставление как можно большей информации о состоянии конструкции (изменение температурных и деформационных полей) в режиме реального времени. Это трудная, но необходимая работа, с учетом того, что конструкции всегда подвержены старению и воздействию внешних факторов. Особо стоит отметить, что в многослойных композитах имеется высокая вероятность развития повреждений во

время эксплуатации. Поэтому актуальной является задача установления дефектов различного рода (пор, смоляных карманов, расслоений и т.д.) при помощи ВОД [26, 27]. Однако для более корректного прогнозирования повреждений натурные данные необходимо сравнивать с модельными значениями, полученными в результате моделирования соответствующих эксплуатационных нагрузок.

В работе [28] авторы исследуют напряженно-деформированное состояние в образцах из ПКМ в непосредственной близости от оптического волокна, внедренного в образец на этапе изготовления. Особое внимание уделяется моделированию смоляного кармана вблизи внедренного оптического волокна при различных схемах армирования. При моделировании ПКМ используется многослойная модель, в которой композиционный материал представляется в виде стопки слоев, каждый из которых представляет собой однородное анизотропное тело. Анализ НДС в окрестности оптического волокна, внедренного в КМ, проводился в соответствии со следующими расчетными схемами: однородная ортотропная упругая среда с внедренным оптоволоконном без смоляного кармана; многослойная модель из ПКМ с волокном, внедренным между слоями $[0^\circ/0^\circ]$, что не приводит к образованию смоляного кармана; многослойная модель ПКМ с волокном, внедренным между слоями $[0^\circ/90^\circ]$ или $[90^\circ/90^\circ]$, что приводит к образованию кармана. Авторы оценили влияние жесткости и толщины защитного покрытия оптического волокна на уровень концентрации напряжений, характер сингулярности напряжений вблизи смоляного кармана.

Авторы [29] разработали комбинированную вычислительную и экспериментальную методику оценки механических характеристик конструкций из ПКМ. Вычислительная составляющая разработанной методики включает в себя численное моделирование механического поведения конструкций из ПКМ при квазистатическом нагружении. Экспериментальная составляющая основана на измерении деформаций волоконно-оптическими датчиками, встроенными в ПКМ. Для уточнения параметров модели в соответствии с данными, полученными с ВОД, предложен алгоритм, в соответствии с которым решаются обратные задачи для обеспечения совпадений численных и экспериментальных результатов с заданной точностью.

Таким образом, применение ВОД в качестве датчиков контроля в системах мониторинга обосновывается рядом их преимуществ, таких как высокая чувствительность, малые габариты, возможность внедрения в слоистую структуру композита и взаимодействия с другими датчиками, устойчивость к электромагнитному излучению, стойкость к агрессивным средам [30]. Однако при внедрении ВОД непосредственно в структуру ПКМ возникают следующие проблемы: сложность внедрения ВОД на этапе изготовления в силу хрупкости волокна, сложности базирования чувствительного элемента в конструкции, обеспечение целостности ВОД на выходе из полимерной конструкции. При решении задачи обеспечения целостности ВОД авторы в работе [31]

исследовали возможность обеспечения одноосного напряженного состояния ВОД на основе использования капиллярной трубки в области волоконной брэгговской решетки, защищающей решетку от воздействия поперечной деформации. Это позволяет использовать прямую зависимость между измеренным значением сдвига длины волны Брэгга и продольной деформацией. При помощи программных пакетов авторы изучили геометрические и механические параметры капиллярной трубки. На основе численного анализа было установлено, что капиллярная трубка не оказывает влияния на модуль упругости. Однако наличие полости в капилляре привело к увеличению концентрации напряжений.

Другим возможным решением описанных выше проблем является возможность создания Smart-слоя, позволяющего защитить волоконно-оптические датчики и выводы оптического волокна, обеспечить точность базирования чувствительного элемента в области контроля. В настоящее время только компания Acellent Technologies Inc. разработала новый подход к исследованию работоспособности композитной или металлической конструкции с помощью встроенных распределенных сенсорных сетей. Запатентованный Acellent SMART Layer [32] представляет собой чрезвычайно тонкую диэлектрическую пленку с набором прочных сетевых пьезоэлектрических датчиков. SMART Layer хорошо зарекомендовал себя в области мониторинга состояния конструкций. Данная разработка способна обеспечить более широкий структурный охват для сбора данных через свою сеть датчиков и исполнительных механизмов, встроенных в слой, таким образом, устраняя необходимость установки каждого датчика отдельно. К преимуществам Acellent SMART Layer относятся: гибкость и адаптируемость к любой 2D- или 3D-структуре и геометрии; встраиваемость в композитные конструкции или монтируемость на поверхностях существующих металлических и композитных конструкций; возможность подключения нескольких каналов для повышения живучести конструкций, что позволяет проводить ремонт в полевых условиях на основе отдельных датчиков. Однако Acellent Technologies Inc при изготовлении SMART Layer использует полиимидные пленки, которые обладают плохой адгезией к углепластикам. Толщина такой пленки от 30 до 100 мкм, что может существенно повлиять на ФМХ конструкции при внедрении в конструкцию. На основании вышесказанного можно сделать вывод, что внедрение SMART Layer в конструкции из полимерных композиционных материалов является неэффективным.

Авторским коллективом Пермского национального исследовательского политехнического университета и научно-образовательного центра авиационных композитных технологий разработаны прототипы Smart-слоев, которые состоят из волоконно-оптических датчиков и различных полимерных материалов, позволяющих обеспечить целостность оптических выводов и точность базирования при непосредственном внедрении в кон-

струкцию. Однако внедрение таких слоев непосредственно в структуру композита эквивалентно внедрению макродефекта, и открытым остается вопрос о влиянии такого внедрения на физико-механические характеристики готовой конструкции.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния внедренного оптоволокну и разработанного Smart-слоя на физико-механические характеристики прототипов конструкций из полимерных композиционных материалов при квазистатическом нагружении, а именно при проведении механических испытаний на растяжение, сжатие и межслоевой сдвиг.

1. Проведение механических испытаний

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

Для изготовления Smart-слоя на основе различных полимерных материалов целесообразно сформулировать ряд требований, которые будут соответствовать особенностям технологий изготовления изделий из ПКМ:

1) материал Smart-слоя не должен переходить в вязкотекучее состояние при температурах формования образцов из ПКМ (180 °С);

2) материал Smart-слоя должен полностью защищать волоконно-оптическую линию как при внедрении в структуру конструкции из ПКМ, так и при поверхностном размещении чувствительных элементов.

Таким образом, для изготовления Smart-слоев различной конфигурации были выбраны следующие материалы: полимерная армированная сетка (ПАС) из стекловолокна с температурой плавления 250 °С, не армированный полиуретан (ПУ) с температурой плавления 200 °С и не армированный полиамид (ПА) с температурой плавления 220 °С.

Для внедрения волоконно-оптических линий в полимерные материалы и создания Smart-слоя спроектирована технологическая оснастка для их сплавления и фиксации ВОД. Оснастка обеспечивает точность базирования волоконных линий, непосредственно по центру изготавливаемого Smart-слоя. Для этого в оснастке выполнены пазы, диаметр которых соответствует диаметру оптического волокна (0,2 мм). Волоконная линия укладывается в паз и жестко фиксируется, что позволяет сохранить ее неподвижность при сплавлении полимерных материалов, тем самым обеспечивается позиционирование брэгговских решеток в структуре слоя.

В рамках экспериментальной части исследования изготовлены образцы из десяти слоев текстильного равно-

прочного углепластика для проведения пяти серий механических испытаний. Первая серия эксперимента включала в себя проведение испытаний на растяжение, сжатие и межслоевой сдвиг образцов из углепластика для определения эталонных (базовых) характеристик. Вторая серия экспериментальных исследований проводилась на образцах из углепластика с внедренным оптическим волокном. Третья, четвертая и пятая серии эксперимента заключались в испытаниях образцов с внедренным Smart-слоем различных конфигураций на основе: полимерной армированной сетки из стеклоровинга; не армированного полиуретана; не армированного полиамида. Для обеспечения достоверности результатов экспериментальных исследований для каждой серии испытаний и всех типов нагружения изготовлено по пять образцов.

Образцы изготовлены в соответствии с требованиями российских и международных стандартов ГОСТ и ASTM [33–35]. На рис. 1 представлены образцы на этапе изготовления, с внедренными волоконными линиями и Smart-слоем различной конфигурации, а также схема внедрения Smart-слоев в стандартные образцы для проведения механических испытаний. Волоконно-оптические

кие линии и Smart-слой укладывались вдоль основы ткани между пятым и шестым слоем.

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 (рис. 2).

Статистическая обработка экспериментальных данных осуществляется по следующим соотношениям:

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

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

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

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

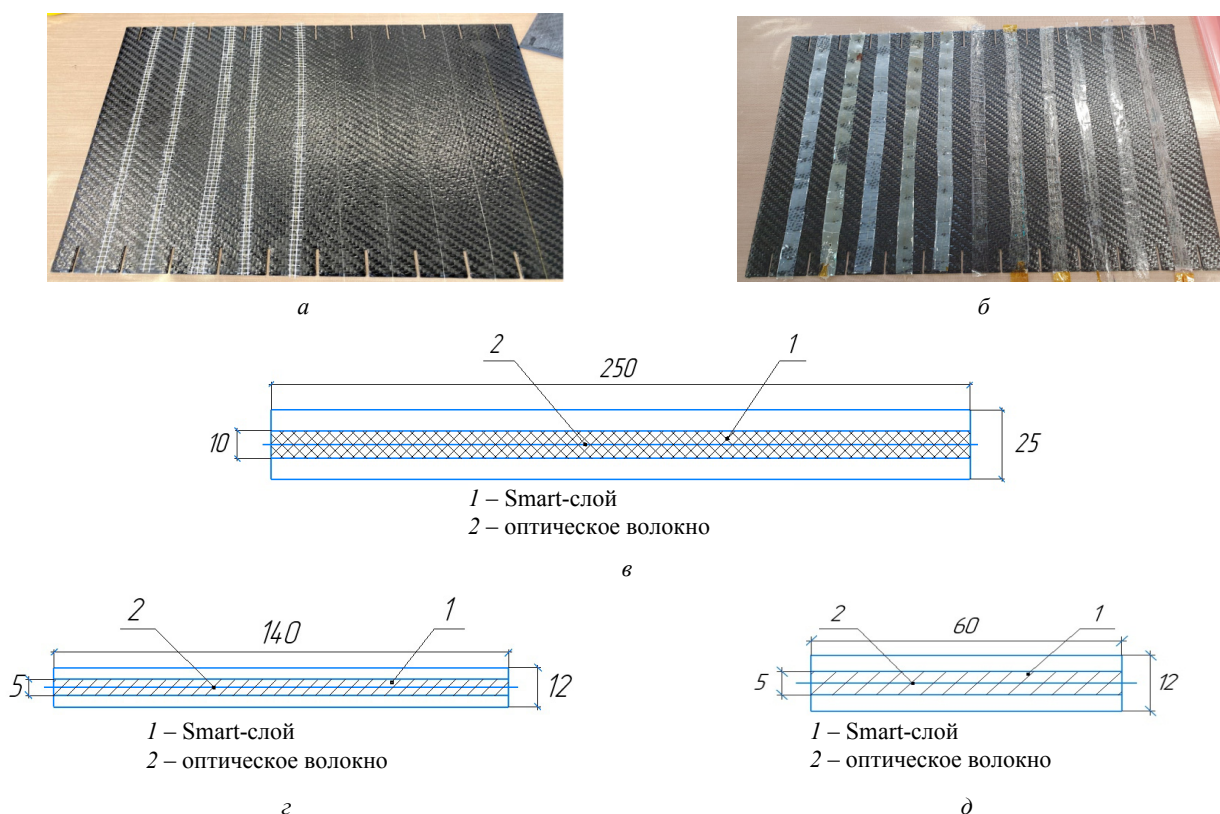


Рис. 1. Образцы из ПКМ на этапе изготовления: *a* – образцы с внедренными оптическими линиями и Smart-слоем на основе полимерной армированной сетки; *b* – образцы с внедренным слоем из полиамида и полиуретана; *в* – схема внедрения Smart-слоя в стандартный образец на растяжение; *г* – схема внедрения Smart-слоя в стандартный образец на сжатие; *д* – схема внедрения Smart-слоя в стандартный образец на межслоевой сдвиг

Fig. 1. CFRP samples at the manufacturing stage: *a* – samples with embedded optical lines and a Smart-layer based on a polymer reinforced mesh; *b* – samples with an embedded layer of polyamide and polyurethane; *c* – the Smart-layer circuit implementation in a standard tensile specimen; *d* – the Smart-layer circuit implementation in a standard sample in compression; *e* – the introduction of Smart-layer circuit in the standard sample on the interlayer bending

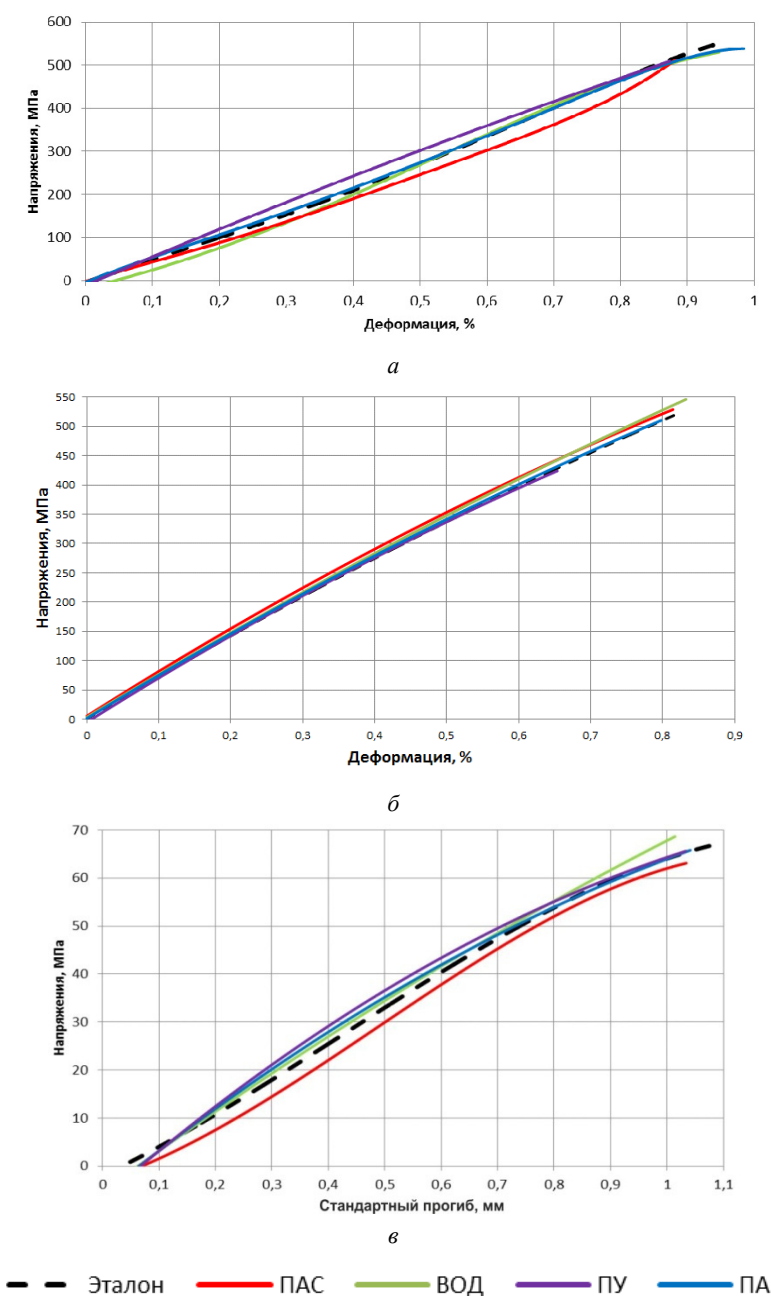


Рис. 2. Обобщенные диаграммы деформирования образцов: *a* – при растяжении; *б* – при сжатии; *в* – при межслоевом сдвиге

Fig. 2. Pooled diagrams of straining samples: *a* – under tensile; *b* – under compression; *c* – with the interlayer shear

В табл. 1 представлены результаты статистической обработки по всем сериям механических испытаний образцов.

По результатам проведения экспериментальных исследований можно сделать выводы о применимости разработанных Smart-слоев в изделиях из полимерных композиционных материалов:

1. Отличие предела прочности эталонных образцов от образцов с ВОД лежит в рамках инженерной погрешности, и внедренное оптоволокно не оказывает существенного влияния на ФМХ образцов.

2. Smart-слой на основе полиуретана обладает эластичностью и гибкостью, что эффективно защищает внедренные ВОД и позволяет применять их как при

поверхностном мониторинге конструкций, так и при внутреннем, даже с учетом падения прочности материала при растяжении на 6,6 %, при сжатии на 18,2 %, при межслойном сдвиге методом короткой балки на 12 % по сравнению с эталонными образцами.

3. Smart-слой на основе полиамида при поперечной нагрузке разрушается и деформирует волоконно-оптические датчики, что говорит о его непригодности к монтажу на поверхности конструкции, поскольку объекты мониторинга могут испытывать различные виды нагружения. При этом представленный Smart-слой снижает физико-механические характеристики ПКМ при растяжении на 2,1 %, при сжатии на 4,3 %, при межслойном сдвиге на 8,9 % по сравнению с эталонными образцами.

Таблица 1

Данные по статистической обработке результатов механических испытаний

Table 1

Data on statistical processing of mechanical test results

Тип образца		$E_{\text{рас}}$, ГПа	$\sigma_{\text{рас}}$, МПа	$E_{\text{сж}}$, ГПа	$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	$\sigma_{\text{сд}}$, МПа
Эталонные образцы	\bar{x}	50,2	544,0	68,9	503,8	64,4
	s	0,504	30,6	1,33	23,9	1,71
	$v, \%$	1,01	5,62	1,93	4,47	2,65
Образцы с ВОД	\bar{x}	50,2	515,0	69,1	519,1	62,9
	s	2,28	32,6	1,9	27,95	4,41
	$v, \%$	4,53	6,32	2,75	5,38	7,01
Образцы со Smart-слоем на основе полимерной армированной сетки	\bar{x}	51,2	442,6	70,0	503,1	61,5
	s	1,12	48,6	1,46	25,3	1,55
	$v, \%$	2,18	10,98	2,08	5,02	2,51
Образцы со Smart-слоем на основе полиамида	\bar{x}	48,7	532,5	71,4	482,0	58,7
	s	0,314	28,2	2,17	28,95	4,31
	$v, \%$	0,64	5,29	3,04	6	7,34
Образцы со Smart-слоем на основе полиуретана	\bar{x}	47,9	508,0	71,4	412,3	56,7
	s	0,63	57,6	1,66	14,09	4,42
	$v, \%$	1,32	11,32	2,33	3,42	7,8

Примечание. $E_{\text{рас}}$ – модуль упругости при растяжении; $\sigma_{\text{рас}}$ – предел прочности при растяжении; $E_{\text{сж}}$ – модуль упругости при сжатии; $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности при сжатии; $\sigma_{\text{сд}}$ – предел прочности при межслоевом сдвиге.

Таблица 2

Механические характеристики материалов в расчетной модели

Table 2

Mechanical characteristics of materials in the design model

Характеристики	Материал		
	углепластик	полимерное волокно	эпоксидное связующее
E_{11} , ГПа	50	90	3,78
E_{22} , ГПа	50	10	
E_{33} , ГПа	6	10	
G_{12} , ГПа	19,5	5	1,4
G_{32} , ГПа	3	3,85	
G_{13} , ГПа	3	5	
ν_{12}	0,05	0,3	0,35
ν_{23}	0,3	0,4	
ν_{13}	0,3	0,3	
$\sigma_{11\text{max}}^+$, МПа	545	4200	55
$\sigma_{22\text{max}}^+$, МПа	545	35	
$\sigma_{33\text{max}}^+$, МПа	50	35	
$\sigma_{11\text{max}}^-$, МПа	475	675	
$\sigma_{22\text{max}}^-$, МПа	475	120	
$\sigma_{33\text{max}}^-$, МПа	140	120	
$\tau_{12\text{max}}$, МПа	120	80	–
$\tau_{23\text{max}}$, МПа	50	45	
$\tau_{13\text{max}}$, МПа	50	80	

Примечание. E_{11} – модуль упругости в направлении Ox ; E_{22} – модуль упругости в направлении Oy ; E_{33} – модуль упругости в направлении Oz ; G_{12} – модуль сдвига в плоскости Oxy ; G_{23} – модуль сдвига в плоскости Oyz ; G_{13} – модуль сдвига в плоскости Oxz ; ν_{12} – коэффициент Пуассона в плоскости Oxy ; ν_{23} – коэффициент Пуассона в плоскости Oyz ; ν_{13} – коэффициент Пуассона в плоскости Oxz ; $\sigma_{11\text{max}}^+$ – предел прочности при растяжении в направлении Ox ; $\sigma_{22\text{max}}^+$ – предел прочности при растяжении в направлении Oy ; $\sigma_{33\text{max}}^+$ – предел прочности при растяжении в направлении Oz ; $\sigma_{11\text{max}}^-$ – предел прочности при сжатии в направлении Ox ; $\sigma_{22\text{max}}^-$ – предел прочности при сжатии в направлении Oy ; $\sigma_{33\text{max}}^-$ – предел прочности при сжатии в направлении Oz ; $\tau_{12\text{max}}$ – предел прочности при сдвиге в плоскости Oxy ; $\tau_{23\text{max}}$ – предел прочности при сдвиге в плоскости Oyz ; $\tau_{13\text{max}}$ – предел прочности при сдвиге в плоскости Oxz .

4. Smart-слой на основе полимерной сетки снизил показатели предела прочности ПКМ при растяжении на 18,6 %, при сжатии на 0,1 %, при межслойном сдвиге методом короткой балки на 4,5 % по сравнению с эталонными образцами.

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что Smart-слой на основе полиамида фактически не влияет на физико-механические характеристики тканого полимерного композиционного материала, однако он пригоден только для внедрения в структуру материала. Слои из полимерной сетки и полиуретана более технологичны и могут быть использованы для определения деформаций как на поверхности объекта мониторинга, так и внутри структуры материала. Однако данные конфигурации Smart-слоев оказывают существенное влияние на ФМХ ПКМ при внедрении в структуру. Исходя из вышесказанного, необходимо более детально изучить механизм влияния внедренного Smart-слоя на основе полимерной сетки и полиуретанового слоя на физико-механические характеристики образцов из ПКМ.

Для дальнейшего анализа полученных результатов проводится математическое моделирование механического поведения образцов с полимерной армированной сеткой и слоем на основе полиуретана, в силу их наибольшего отклонения от эталонных значений предела прочности.

2. Математическое моделирование механического поведения образцов со Smart-слоем

2.1. Моделирование механического поведения образцов со Smart-слоем на основе полимерной армированной сетки

Наибольшее снижение механических характеристик относительно эталонных значений произошло при растяжении образцов со Smart-слоем на основе полимерной армированной сетки со стеклоровинговой нитью, поэтому проведено численное моделирование для определения причин и механизма разрушения. Для расчета использовалась геометрическая модель, представляющая 10 слоев равнопрочного углепластика и центральный Smart-слой на основе эпоксидного связующего и армирующей сетки из полимерных волокон (рис. 3, а). Для снижения трудоемкости расчета рассматривалась локальная зона образца материала, размер которой был принят равным 12×12 мм. Расчет напряженно-деформированного состояния образца материала производился в программном пакете ANSYS на основе метода конечных элементов в форме перемещений.

В табл. 2 представлены механические характеристики материалов, использованных в расчете. При расчете приняты следующие допущения: все материалы обладают линейно-упругими характеристиками, материал углепластика – трансверсально-изотропный, материал полимерных волокон сетки – анизотропный, мате-

риал эпоксидного связующего – изотропный. Для приращения телам анизотропных свойств материала создавались локальные системы координат, ориентированные соответствующим образом. Кроме этого, принято допущение о совместности деформации элементов модели. Для расчетной модели генерировалась упорядоченная и совместная на границах контакта отдельных тел конечно-элементная сетка. Размерность конечных элементов подбиралась на основании графика сеточной сходимости. Минимальный характерный размер элемента в модели равен 0,05 мм, дальнейшее уменьшение размерности не приводило к существенному повышению точности решения по критерию максимальных нормальных напряжений. В качестве граничных условий для случаев одноосного растяжения задавались перемещение, эквивалентные 0,865 % деформации образца в продольном направлении, что соответствует значению максимальных нормальных деформаций, полученных по результатам испытаний на растяжение образцов материала. Граничное условие перемещений задавалось с противоположных границ геометрической модели, расположенных по направлению укладки основы материала.

Оценка прочности компонентов Smart-слоя производилась по критерию максимальных нормальных напряжений (4) для элементов в виде полимерных волокон, прочность эпоксидного связующего, расположенного внутри полимерной сетки, оценивалась по критерию максимальных напряжений по Мизесу:

$$\sigma_i < \sigma_{i\max}, \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right)}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{vonMises}} < \sigma_{\max}, \quad (6)$$

где σ_i – нормальные напряжения, возникающие в i -м направлении; $\sigma_{i\max}$ – предел прочности материала в i -м направлении; σ_{vonMises} – напряжения по критерию Мизеса.

В результате расчета определены значения напряжений, возникающих в отдельных компонентах Smart-слоя образца при одноосном 0,865 % растяжении. Нагружение осуществлялось вдоль оси X глобальной системы координат. Нити основы ПАС ориентированы вдоль оси X , нити утка направлены вдоль оси Z соответственно (рис. 3, а). Полученные напряжения сравнивались с предельно допустимыми значениями. Для случая растяжения было определено, что в полимерных волокнах сетки, расположенных в направлении утка, возникали нормальные напряжения в поперечном направлении, равные 248 МПа (рис. 3, б), что существенно превышает предел прочности материала волокна при растяжении в поперечном направлении (35 МПа). При этом максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в эпоксидном связующем, расположенном между ячейками, образованными полимерными волокнами, были равны 60 МПа (рис. 3, в), что на 10 МПа больше предела прочности.

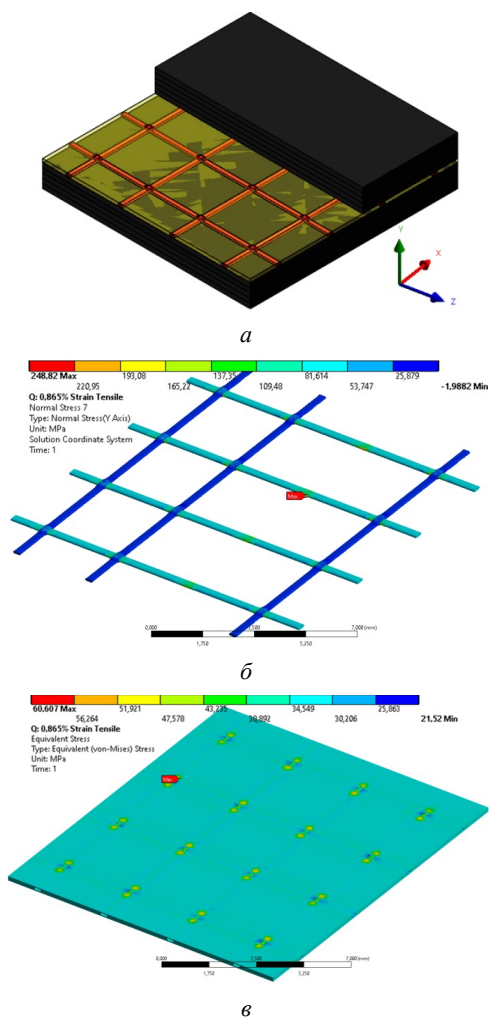


Рис. 3. Результаты математического моделирования: *a* – общий вид модели; *б* – нормальные напряжения по направлению 0 в нитях полимерной сетки; *в* – напряжения по Мизесу в эпоксидном связующем

Fig. 3. Results of mathematical modeling: *a* – the general view of the model; *b* – normal stresses in the direction of 0 in the threads of the polymer mesh; *c* – von Mises stresses in the epoxy binder

Проведенное численное моделирование дает возможность сделать предположение о механизмах разрушения образцов со Smart-слоем на основе полимерной армированной сетки: в первую очередь происходит разрушение уточных полимерных нитей, что приводит к локальному ослаблению поперечного сечения образца, что подтверждено при проведении разрушающего контроля образцов (рис. 4, *a*). Во-вторых, на этапе формования образца происходит вдавливание нити основы ПАС в армирующий наполнитель ПКМ, тем самым происходит локальное уменьшение эффективного поперечного сечения нити основы углеродного волокна (рис. 4, *б*).

Затем образуются дефекты внутри полимерной матрицы, что впоследствии приводит к разрушению Smart-слоя и исключению его вклада в суммарную жесткость и прочность образца. Для исключения такой модели механического разрушения материала целесообразным является подбор другого волокна в полимерной сетке.

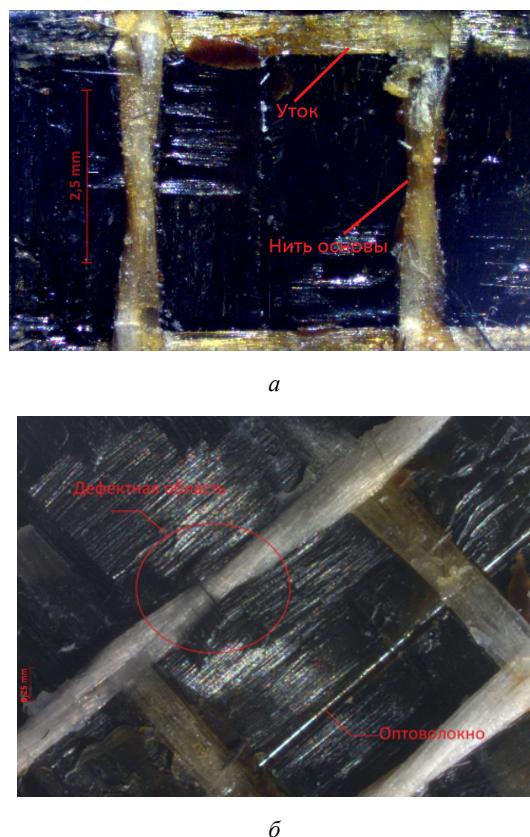


Рис. 4. Образец из ПКМ с внедренным слоем на основе полимерной сетки после разрушающего контроля: *a* – разрушение уточных нитей ПАС; *б* – вдавливание нити основы ПАС в армирующий наполнитель

Fig. 4. Samples of the CFRP layer with an embedded layer based on the polymeric mesh after destructive testing: (*a*) destruction of the PAS weft threads, (*b*) indentation of the PAS warp thread into the reinforcing filler

2.2. Моделирование механического поведения образцов со Smart-слоем на основе не армированного полиуретана

Далее проведено исследование механического поведения образцов со Smart-слоем на основе полиуретановой пленки, поскольку механические испытания показали существенное (порядка 18 %) снижение механических свойств образцов материала при сжатии относительно эталонных значений. При расчете использовалась геометрическая модель, представляющая 10 слоев равнопрочного углепластика, и помещенный в центр Smart-слой на основе полиуретановой пленки с включением в виде световода оптического волокна из кварцевого стекла и полиимидной оболочки. Толщина моно слоя углепластика была принята равной 0,26 мм, толщина полиуретанового слоя 0,308 мм, диаметр кварцевого световода 0,125 мм, диаметр полиимидной оболочки волокна 0,19 мм. Для снижения трудоемкости расчета рассматривалась локальная зона образца материала, размер которой был принят равным 12×12 мм. На рис. 5, *a* представлен общий вид геометрической модели.

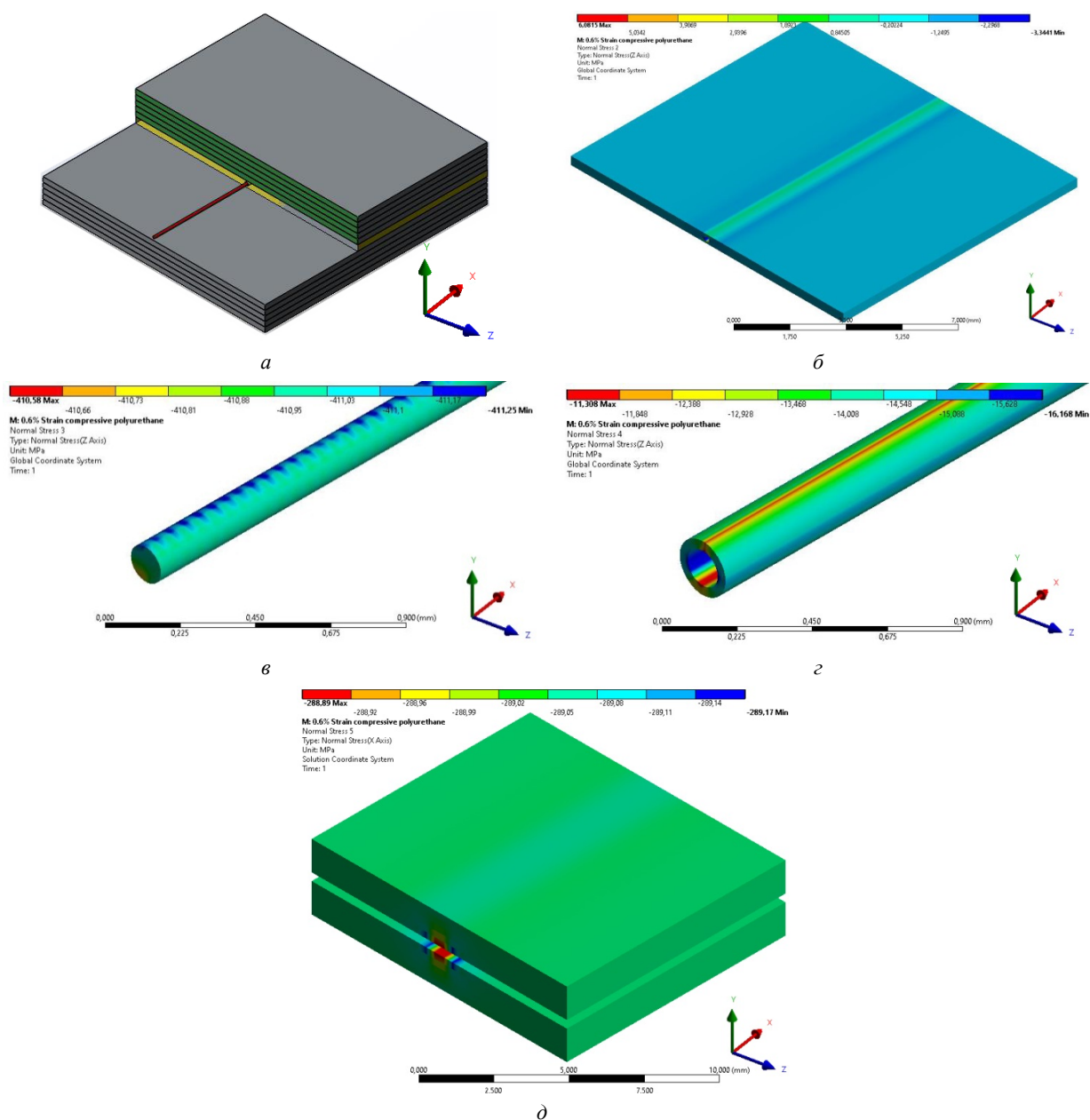


Рис. 5. Результаты математического моделирования: *a* – общий вид геометрической модели образца со Smart-слоем на основе полиуретановой пленки; *b* – нормальные напряжения в слое из полиуретановой пленки; *в* – кварцевом световоде; *г* – полиимидной оболочке; *д* – слоях углеродистого волокна

Fig. 5. Results of the mathematical modeling: *a* – a general view of the geometric model of the sample with a Smart-layer based on a polyurethane film; *b* – normal stresses in a layer of the polyurethane film; *c* – a silica fiber; *d* – a polyimide shell; *e* – layers of the carbon fiber

В табл. 2, 3 представлены механические характеристики материалов, использованные при расчете. Допущения, принятые в модели, аналогичны рассматриваемой ранее задаче по расчету напряженно-деформированного состояния образца со Smart-слоем на основе полимерной сетки. Материалы полиуретанового слоя, кварцевого световода и полиимидной оболочки – линейно-упругие и изотропные. Допущение о линейной упругости полиуретана примем верным при условии расчета с малыми деформациями (до 2%), которые воспринимали образцы при разрушении в ходе механических испытаний. Оценка прочности компонентов Smart-слоя производилась по критерию максимальных нор-

мальных напряжений (4). В качестве граничных условий для случаев одноосного сжатия задавались перемещения, эквивалентные 0,6% деформации образца в продольном направлении, что соответствует данным, полученным при экспериментальных исследованиях.

В результате расчета определены значения напряжений, возникающих в отдельных компонентах Smart-слоя образца при одноосном сжатии. В модели нагружение осуществлялось вдоль оси *X* глобальной системы координат. Полученные значения напряжений сравнивались с предельно допустимыми показателями. Максимальные напряжения сжатия, возникающие в полиуретановом слое, оказались равны 3 МПа, растягиваю-

щие – 6 МПа (см. рис. 3, б). Максимальные напряжения сжатия в кварцевом световоде – 410 МПа (см. рис. 3, в), в полиимидной оболочке световода – 16 МПа (рис. 3, з). Максимальные нормальные сжимающие напряжения в слоях углепластика – 289 МПа (рис. 3, е).

Таблица 3

Механические характеристики материалов
в расчетной модели

Table 3

Mechanical properties of materials
in the calculated model

Характеристики	Материал		
	кварцевое стекло	полиимид	полиуретан
E , ГПа	71,4	2,5	167
G , ГПа	30,5	0,93	56
ν	0,17	0,35	0,496
σ_{\max}^- , МПа	590	91	–

Примечание. E – модуль упругости; G – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона; σ_{\max}^- – предел прочности при сжатии.

При проведении численного моделирования механических испытаний образцов из углепластика с внедренным Smart-слоем на основе полиуретана установлено, что согласно выбранному критерию напряжения в полиуретановом слое допустимые. Однако если предположить, что полиуретановый слой ведет себя как «гиперупругое» тело, то он может выдерживать большие деформации. Следует отметить, что в математической модели принята гипотеза об идеальной адгезии между полиуретановым слоем и углепластиком, что в реальности невозможно. Следовательно, необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на улучшение адгезии между полиуретановым слоем и углепластиком, например обработка поверхностей плазмой или использование эпоксидно-полиуретановой смолы при создании Smart-слоя, т.е. рассмотрение технологии изготовления слоя пропиткой эпоксидно-полиуретановым связующим.

Заключение

В рамках проведенного исследования изготовлены прототипы Smart-слоев различной конфигурации. Проведены механические испытания изготовленных образцов. Отличие предела прочности эталонных образцов от образцов с волоконно-оптическими датчиками лежит в рамках инженерной погрешности, и внедренное оптоволокно не оказывает существенного влияния на физико-механические характеристики материала. Анализируя механическое поведение образцов с внедренными Smart-слоями различной конфигурации, можно отметить следующее:

1. Smart-слой на основе полиуретана обладает эластичностью и гибкостью, что эффективно защищает внедренные ВОД и допускает их применение как при поверхностном мониторинге конструкций, так и при внутреннем. При математическом моделировании установлено, что напряжения в полиуретановом слое согласно критерию максимальных нормальных напряжений допустимые. Отличие экспериментальных данных от модельных может быть обосновано принятой в расчете гипотезой об идеальной адгезии, что в действительности невозможно. В дальнейшем планируется проанализировать вопросы, связанные с улучшением адгезии, а именно: рассмотреть способы обработки поверхности, такие как плазменная и химическая, а также возможность перфорации слоя или рассмотреть технологию изготовления слоя пропиткой эпоксидно-полиуретановым связующим.

2. Внедренный полиамидный слой незначительно снижает ФМХ изготовленных образцов и рекомендуется только при непосредственном внедрении. Монтрование полиамидного слоя на поверхность не рекомендуется в связи с вероятностью разрушения и деформирования ВОД при комбинированном нагружении конструкций.

3. Smart-слой на основе полимерной сетки существенно снижает ФМХ. При анализе численных результатов установлено, что в первую очередь происходит разрушение уточных полимерных нитей в районе переплетения с нитями основы, что приводит к ослаблению поперечного сечения образца. Этот результат подтвержден при проведении разрушающего контроля образцов, в ходе которого установлено, что полимерная армированная сетка нарушила целостность нити основы тканого наполнителя, что привело к нарушению геометрического расположения и локальному пережатию нити основы за счет особенностей геометрии ПАС. В дальнейшем планируется рассмотреть возможность использования полимерной сетки с другим типом армирующего волокна.

Благодарность

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

Acknowledgments

The results were obtained during the fulfillment of 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).

Библиографический список

1. К вопросу об интеграции оптоволоконна в ПКМ и изменении деформации материала с помощью волоконных Брэгговских решеток / М.А. Зуев, В.В. Махсидов, М.Ю. Федотов, А.М. Шиенок // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т. 20, № 4. – С. 568–574.
2. Fracture mechanism characterization of cross-ply carbon-fiber composites using acoustic emission analysis / Y. Mizutani, K. Nagashima, M. Takemoto, K. Ono // NDT&E Int. – 2000. – Vol. 33(2). – P. 101–110.
3. Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 1. – P. 50–57.
4. Towsyfyan H., Biguri A., Boardman R., Blumensath T. Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures // Chinese Journal of Aeronautics. – 2020. – Vol. 33. – Is.3. – Pp. 771–791.
5. Comparison of low-velocity impact damage in thermoplastic and thermoset composites by non-destructive three-dimensional X-ray microscope / T. Lu, X. Chen, H. Wang, L. Zhang, Y. Zhou // Polymer Testing. – 2020. – Vol. 91. – P. 1–13.
6. Non-destructive methods to evaluate the self-healing behavior of engineered cementitious composites (ECC) / Y. Zhu, Z. Zhang, X. Chen, D. Zou, X. Guan, B. Dong // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 230. – P. 1–8.
7. Wali A.S., Tyagi A. Neural network based smart damage deduction using a fiber optic sensor for aluminium 6063 cantilever beam. // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 21. – P. 1412–1416.
8. Experimental investigation of strain sensitivity for surface bonded fibre optic sensors / P. Motwani, N. Perogamvros, S. Taylor, M. Sonebi, A. Laskar, A. Murphy // Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – Vol. 303. – P. 1–13.
9. A new approach to predicting multiple damage states in composite laminates with embedded FBG sensors / S. Yashiro, N. Takeda, T. Okabe, H. Sekine // Composites Science and Technology. – 2005. – Vol. 65. – P. 659–667.
10. Fan Y., Kahrizi M. Characterization of a FBG strain gage array embedded in composite structure // Sensors Actuators, A Phys. – 2005. – Vol. 121, no. 2. – P. 297–305.
11. Application of optical fiber as strain gauges in polymer composite materials / E.N. Kablov, D.V. Sivakov, I.N. Gulyaev, K.V. Sorokin, M.Y. Fedotov, E.M. Dianov, S.A. Vasil'ev, O.I. Medvedkov // Polym. Sci. Ser. D. – 2011. – Vol. 4, no. 3. – P. 246–251.
12. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material / V.P. Matveenko, I.N. Shardakov, A.A. Voronkov, N.A. Kosheleva, D.S. Lobanov, G.S. Serovaev, E.M. Spaskova, G.S. Shipunov // Struct Control Health Monit. – 2018. – Vol. 25. – P. 1–11.
13. Farrar C.R., Worden K. An introduction to structural health monitoring. // Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci. – 2007. – Vol. 365, no. 1851. – P. 303–315.
14. Sante R.D. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications // Sensors. – 2015. – Vol. 15, no. 8. – P. 18666–18713.
15. 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. – 2015. – Vol. 71. – P. 52–62.
16. Sbarufatti C., Manes A., Giglio M. Application of sensor technologies for local and distributed structural health monitoring // Struct. Control Heal. Monit. – 2014. – Vol. 21, no. 7. – P. 1057–1083.
17. Read I.J., Foote P.D. Sea and flight trials of optical fiber Bragg grating strain sensing systems // Smart Mater. Struct. – 2001. – Vol. 10. – P. 1085–1094.
18. In-flight health monitoring of a subscale wing using a fiber Bragg grating sensor system / J.R. Lee, C.Y. Ryu, B.Y. Koo, S.G. Kang, C.S. Hong, C.G. Kim // Smart Mater. Struct. – 2003. – Vol. 12. – P. 147–155.
19. Joham Alvarez-Montoya, Alejandro Carvajal-Castrillón, Julián Sierra-Pérez. In-flight and wireless damage detection in a UAV composite wing using fiber optic sensors and strain field pattern recognition // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – Vol. 136. – P. 1–26.
20. A survey of health monitoring systems for wind turbines / M.L. Wymore, J.E. Van Dam, H. Ceylan, D. Qiao // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2015. – Vol. 52, no. 1069283. – P. 976–990.
21. Sierra-Pérez J., Torres-Arredondo M.A., Güemes A. Damage and nonlinearities detection in wind turbine blades based on strain field pattern recognition. FBGs, OBR and strain gauges comparison // Compos. Struct. – 2016. – Vol. 135. – P. 156–166.
22. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques / C.Y. Hong, Y.F. Zhang, M.X. Zhang, L.M.G. Leung, L.Q. Liu // Sensors and Actuators, A: Physical. – 2016. – Vol. 244. – P. 184–197.
23. Applications of FBG-based sensors to ground stability monitoring / A. Bin Huang, C.C. Wang, J.T. Lee, Y. Te Ho // J. Rock Mech. Geotech. Eng. – 2016. – Vol. 8, no. 4. – P. 513–520.
24. Прохоров А.Е., Плехов О.А. Разработка системы мониторинга нестационарных температур и деформаций во влагонасыщенном грунте в условиях фазового перехода на базе оптоволоконных датчиков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 131–139. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.11
25. Integration and assessment of fibre Bragg grating sensors in an all-fibre reinforced polymer composite road bridge / Y.M. Gebremichael, W. Li, W.J.O. Boyle, B.T. Meggitt, K.T.V. Grattan, B. McKinley, G.F. Fernando, G. Kister, D. Winter, L. Canning, S. Luke // Sensors Actuators, A Phys. – 2005. – Vol. 118, no. 1. – P. 78–85.
26. Shivakumar K., Bhargava A. Failure Mechanics of a Composite Laminate Embedded with a Fiber Optic Sensor // Journal of Composite Materials. – 2005. – Vol. 39, no. 9. – P. 1–23.
27. Finite element prediction of resin pocket geometry around embedded optical fiber sensors in prepreg composites / N. Lammens, G. Luyckx, E. Voet, W.V. Paepegem, J. Degrieck // Composite Structures. – 2015. – Vol. 132. – P. 825–832.
28. Strain measurement and stress analysis in the vicinity of a fiber Bragg grating sensor embedded in a composite material / A.Y. Fedorov, N.A. Kosheleva, V.P. Matveenko, G.S. Serovaev // Composite Structures. – 2020. – Vol. 239. – P. 1–12.
29. Tashkinov M.A., Matveenko V.P. Method of assessment of mechanical characteristics of quasi-isotropic composite laminates using experimental data from fiber-optic strain sensors // Procedia Structural Integrity. – 2017. – Vol. 5. – P. 577–583.
30. Варжель С.В. Волоконные брэгговские решетки // Ун-т ИТМО. – СПб., 2015. – 65 с.
31. Numerical modeling of the capillary in the Bragg grating area, ensuring uniaxial stress state of embedded fiber-optic strain sensor / G.S. Serovaev, V.P. Matveenko, N.A. Kosheleva, A.Y. Fedorov // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 17. – P. 371–378.
32. Patent USA № 20070018083, G01J 1/04 (2007.01), Structural health monitoring layer having distributed electronics // Armita K.
33. ГОСТ Р 56785–2015. Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов.
34. ГОСТ Р 56812–2015. Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при комбинированной сжимающей нагрузке.
35. ASTM D2344(M16). Short-beam strength testing of polymer matrix composite materials (interlaminar shear).

References

- Zuev M.A., Makhsidov V.V., Fedotov M.Iu., Shienok A.M. K voprosu ob integratsii optovolokna v PKM i izmerenii deformatsii materiala s pomoshch'iu volokonnykh Breggovskikh reshetok // *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*. – 2014. – T. 20, № 4. – Pp. 568–574.
- Mizutani Y., Nagashima K., Takemoto M., Ono K. Fracture mechanism characterization of cross-ply carbon–fiber composites using acoustic emission analysis // *NDT&E Int.* – 2000. – Vol. 33(2). – Pp. 101–110.
- Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials // *Procedia Structural Integrity*. – 2016. – Vol. 1. – Pp. 50–57.
- Towsyfyan H., Biguri A., Boardman R., Blumensath T. Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2020. – Vol. 33. – Is.3. – Pp. 771–791.
- Lu T., Chen X., Wang H., Zhang L., Zhou Y. Comparison of low-velocity impact damage in thermoplastic and thermoset composites by non-destructive three-dimensional X-ray microscope // *Polymer Testing*. – 2020. – Vol. 91. – Pp. 1–13.
- Zhu Y., Zhang Z., Chen X., Zou D., Guan X., Dong B. Non-destructive methods to evaluate the self-healing behavior of engineered cementitious composites (ECC) // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 230. – Pp. 1–8.
- Wali A.S., Tyagi A. Neural network based smart damage deduction using a fiber optic sensor for aluminium 6063 cantilever beam. // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 21. – P. 1412–1416.
- Motwani P., Perogamvros N., Taylor S., Sonebi M., Laskar A., Murphy A. Experimental investigation of strain sensitivity for surface bonded fibre optic sensors. // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2020. – Vol. 303. – Pp. 1–13.
- Yashiro S., Takeda N., Okabe T., Sekine H. A new approach to predicting multiple damage states in composite laminates with embedded FBG sensors. *Composites Science and Technology*. – 2005. – Vol. 65. – Pp. 659–667.
- Fan Y., Kahrizi M. Characterization of a FBG strain gage array embedded in composite structure // *Sensors Actuators, A Phys.* – 2005. – Vol. 121. – No. 2. – Pp. 297–305.
- Kablov E. N., Sivakov D.V., Gulyaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Y., Dianov E.M., Vasil'ev S.A., Mevdedkov O.I. Application of optical fiber as strain gauges in polymer composite materials. // *Polym. Sci. Ser. D*. – 2011. – Vol. 4. – No. 3. – Pp. 246–251.
- Matveenko V.P., Shardakov I.N., Voronkov A.A., Kosheleva N.A., Lobanov D.S., Serovaev G.S., Spaskova E.M., Shipunov G.S. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material // *Struct Control Health Monit.* – 2018. – Vol.25. – Pp. 1 – 11.
- Farrar C. R., Worden K. An introduction to structural health monitoring. // *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.* – 2007. – Vol. 365. – No. 1851. – Pp. 303–315.
- Sante R. D. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications. // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15. – No. 8. – Pp. 18666–18713.
- 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.* – 2015. – Vol. 71. – Pp. 52–62.
- Sbarufatti C., Manes A., Giglio M. Application of sensor technologies for local and distributed structural health monitoring // *Struct. Control Heal. Monit.* – 2014. – Vol. 21. – No. 7. – Pp. 1057–1083.
- Read I. J., Foote P. D. Sea and flight trials of optical fibre Bragg grating strain sensing systems. // *Smart Mater. Struct.* – 2001. – Vol. 10. – Pp. 1085–1094.
- Lee J.R., Ryu C. Y., Koo B.Y., Kang S. G., Hong C.S., Kim C.G. In-flight health monitoring of a subscale wing using a fiber Bragg grating sensor system. // *Smart Mater. Struct.* – 2003. – Vol. 12. – Pp. 147–155.
- Joham Alvarez-Montoya, Alejandro Carvajal-Castrillón, Julián Sierra-Pérez. In-flight and wireless damage detection in a UAV composite wing using fiber optic sensors and strain field pattern recognition // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2020. – Vol. 136. – Pp. 1–26.
- Wymore M. L., Van Dam J. E., Ceylan H., Qiao D. A survey of health monitoring systems for wind turbines. // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2015. – Vol. 52. – No. 1069283. – Pp. 976–990.
- Sierra-Pérez J., Torres-Arredondo M. A., Güemes A. Damage and nonlinearities detection in wind turbine blades based on strain field pattern recognition. FBGs, OBR and strain gauges comparison. // *Compos. Struct.* – 2016. – Vol. 135. – Pp. 156–166.
- Hong C.Y., Zhang Y.F., Zhang M.X., Leung L.M.G., Liu L.Q. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques. // *Sensors and Actuators, A: Physical*. – 2016. – Vol. 244. – Pp. 184–197.
- Bin Huang A., Wang C. C., Lee J. T., Te Ho Y. Applications of FBG-based sensors to ground stability monitoring. // *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* – 2016. – Vol. 8. – No. 4. – Pp. 513–520.
- Prokhorov A.E., Plekhov O.A. A System Development for Monitoring Kinetic Parameters of a Phase Transition in a Fluid-Saturated Soil Based on Fiber Optic Sensors // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2019. – №1. – C. 131–139. doi: 10.15593/perm.mech/2019.1.11.
- Gebremichael Y. M., Li W., Boyle W.J.O., Meggitt B.T., Grattan K.T.V., McKinley B., Fernando G.F., Kister G., Winter D., Canning L., Luke S. Integration and assessment of fibre Bragg grating sensors in an all-fibre reinforced polymer composite road bridge. // *Sensors Actuators, A Phys.* – 2005. – Vol. 118. – No. 1. – Pp. 78–85.
- Shivakumar K., Bhargava A. Failure Mechanics of a Composite Laminate Embedded with a Fiber Optic Sensor. // *Journal of Composite Materials*. – 2005. – Vol. 39. – No.9. – Pp. 1–23.
- Lammens N., Luyckx G., Voet E., Paepegem W.V., Degrieck J. Finite element prediction of resin pocket geometry around embedded optical fiber sensors in prepreg composites. // *Composite Structures*. – 2015. – Vol. 132. – Pp. 825–832.
- Fedorov A.Y., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S. Strain measurement and stress analysis in the vicinity of a fiber Bragg grating sensor embedded in a composite material // *Composite Structures*. – 2020. – Vol. 239. – Pp. 1–12.
- Tashkinov M.A., Matveenko V.P. Method of assessment of mechanical characteristics of quasi-isotropic composite laminates using experimental data from fiber-optic strain sensors. // *Procedia Structural Integrity*. – 2017. – Vol. 5. – Pp. 577–583.
- Varzhel' S.V. Volokonnye breggovskie reshetki // *Un-t ITMO*. – SPb. – 2015. – 65 s.
- Serovaev G.S., Matveenko V.P., Kosheleva N.A., Fedorov A.Y. Numerical modeling of the capillary in the Bragg grating area, ensuring uniaxial stress state of embedded fiber-optic strain sensor. // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol.17. – Pp. 371–378.
- Patent USA № 20070018083, G01J 1/04 (2007.01), Structural health monitoring layer having distributed electronics // Armita K.
- GOST R 56785-2015. Kompozity polimernye. Metod ispytaniia na rastiashenie ploskikh obraztsov.
- GOST R 56812-2015. Kompozity polimernye. Metod opredeleniia mekhanicheskikh kharakteristik pri kombinirovannoi szhimaiushchei nagruzke.
- ASTM D2344(M16). Short-beam strength testing of polymer matrix composite materials (interlaminar shear).