УДК 681.586.5

А.А. Ларин¹, М.Ю. Федотов^{2, 3}, С.В. Бухаров³, В.И. Резниченко³

¹ Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству и эксплуатации трубопроводов, объектов ТЭК – инженеринговая нефтегазовая компания, Москва, Россия

² Объединение юридических лиц Союз производителей композитов, Москва, Россия

³ Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

НОВЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Рассматриваются перспективные области применения волоконно-оптических датчиков для проведения мониторинга технического состояния композитных конструкций различного назначения.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, волоконно-оптический датчик, волоконная брэгговская решетка, мониторинг технического состояния, средства индивидуальной защиты военнослужащих.

A.A. Larin¹, M.Yu. Fedotov^{2, 3}, S.V. Bukharov³, V.I. Reznichenko³

¹ All-Union Scientific Research Institute for Construction and Operation of Pipelines, Facilities of the Fuel and Energy Complex – Engineering Oil and Gas Company, Moscow, Russian Federation

² Association of legal entities Union of Composite Manufacturers, Moscow, Russian Federation

³ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

NEW APPLICATIONS SYSTEMS OF FIBER-OPTICAL SENSORS

Prospective areas of application of fiber-optic sensors for monitoring the technical state of composite structures for various purposes are considered.

Key words: polymeric composite material, fiber-optic sensor, fiber Bragg grating, monitoring of technical condition, means of individual protection of servicemen.

Внедрение полимерных композиционных материалов (далее – ПКМ) на основе полимерных связующих и армирующих наполнителей различной природы открывает широкие возможности при создании

конструкций на их основе применительно к различным отраслям промышленности. Благодаря своим уникальным свойствам – сочетанию высокой удельной прочности и жесткости, малого веса по сравнению с традиционными металлическими материалами, стойкости к агрессивным средам, высокой интегральности и технологичности исполнения ПКМ находят применение в авиастроении, нефтегазовой, химической, космической и иных отраслях промышленности.

В то же время до сих пор не решен ряд проблем, связанных с эксплуатацией конструкций из ПКМ, препятствующих в полной мере осуществить внедрение композитов в нашу повседневную жизнь.

Во-первых, обладая ярко выраженной анизотропией свойств и, как следствие, имея неоднородность структуры как на макро-, так и на микроуровне, ПКМ имеют характерный разброс упругопрочностных свойств до 15 %, что приводит к необходимости учета технологических особенностей производства ПКМ при проектировании, в то время как для металлических материалов характерна повторяемость свойств от партии к партии.

Во-вторых, в полной мере отсутствуют методы диагностики текущего состояния конструкций из ПКМ и прогнозирования их ресурсных характеристик, в том числе после воздействия различных климатических факторов и других внешних воздействий, таких как, например, ударное воздействие. Не решены вопросы обнаружения внутренних эксплуатационных дефектов в режиме онлайн, отсутствуют технические решения, позволяющие оценивать допустимость текущих действующих внутренних и внешних воздействий на композитные конструкции.

Из открытых источников известно, что за рубежом ведется активная работа по созданию так называемых «умных» конструкций (smart structure) с использованием технологий Structure Health Monitoring [1–5], однако внедрение подобных систем в изделия затруднено ввиду отсутствия серийных технологий и технологических процессов производства. При этом ряд разработок имеет двойное назначение и, следовательно, остается закрытым для широкого круга исследователей. Похожая ситуация наблюдается и в отечественной промышленности [6–13].

Первым этапом на пути создания подобных конструкций является разработка системы встроенного контроля технического состояния

материала конструкции в процессе эксплуатации. Перспективным также является создание систем мониторинга состояния композитных изделий в процессе производства, контроля остаточных деформаций [14],

Рис. 1. Основные задачи при создании систем встроенного контроля

а также при отработке технологических режимов, что особенно актуально для толстостенных конструкций. Для решения поставленной цели необходимо решить ряд научных, технических и технологических задач, представленных на рис. 1.

Ключевым моментом при создании данных систем является выбор типов датчиков. Одним из вариантов решения вышеуказанных проблем является применение систем встроенного контроля на основе волоконно-оптических датчиков (далее – ВОД) различных типов. Основные преимущества ВОД для решения задачи мониторинга конструкций из различных материалов приведены на рис. 2.

Рис. 2. Преимущества ВОД

Применение подобных систем является технологически обоснованным с точки зрения структурной, химической и механической совместимости с компонентами ПКМ [15–17] при минимальных массога-

баритных размерах, электромагнитной совместимости с радиоэлектронным оборудованием, мультиплексируемости и стабильности работы ВОД при воздействии эксплуатационных факторов. Здесь и далее речь идет о ВОД на основе волоконных брэгговских решеток (далее – ВБР).

При проектировании композитных конструкций как монолитных, так и трехслойных важным аспектом являются разработка топологии ВОД и организация их ввода / вывода (рис. 3).

Рис. 3. Проектирование композитных конструкций с ВОД

Работы в данном направлении ведутся целым рядом организаций применительно к композитным конструкциям различного назначения [18, 19]. В рамках работ решаются вопросы размещения ВОД в местах действия наибольших потоков сил по конструкции, определяются места оптимального вывода ВОД из массива материала с учетом требований технологичности производства.

Решение технологической задачи тесно связано с итогом предыдущих результатов и является их физическим воплощением (рис. 4).

При интеграции ВОД в структуру ПКМ возникает ряд проблем, связанных с точностью формирования топологии в процессе выкладки препрега в случае автоклавного или прессового формования или слоев армирующего наполнителя в случае изготовления ПКМ методом вакуумной инфузии или пропитки под давлением, а также сложностью формирования зоны ввода/вывода с целью дальнейшей коммутации ВОД. В настоящее время предложен ряд технологических решений, позволяющих решать данные проблемы на практике, однако предлага-

емые решения не являются серийными и связаны с высокой трудоемкостью интеграции ВОД при относительно невысокой вероятности выживания ВОД как в процессе интеграции ВОД и формования изделия, так и при эксплуатации готового изделия. При этом данные подходы могут широко использоваться при испытаниях композитных конструкций сложной формы для оценки изменений напряженно-деформированного состояния вплоть до разрушения.

Рис. 4. Технологические аспекты интеграции ВОД в композитные конструкции

В системах встроенного контроля конструкций из ПКМ с интегрированными ВОД на основе ВБР измеряемой характеристикой является изменение резонансной длины волны $\Delta\lambda$, нм, равное разности текущей λ , нм, и начальной λ_0 , нм (в отсутствие внешнего воздействия) длины волны отраженного сигнала. В процессе эксплуатации и/или испытаний конструкции из ПКМ системой встроенного контроля на основе ВБР с помощью специализированного программного обеспечения регистрируется зависимость $\Delta\lambda = \Delta\lambda(\varepsilon)$ в случае механического воздействия при постоянной температуре, либо $\Delta\lambda = \Delta\lambda(T)$ в случае температурного воздействия в отсутствие механической нагрузки. В общем случае, когда на образец воздействуют и механические, и тепловые нагрузки $\Delta\lambda = \Delta\lambda(\varepsilon, T)$, применяют более сложные методы обработки данных [20, 21].

Коэффициент чувствительности ВОД на основе ВБР к механическому воздействию определяется формулой:

$$\varepsilon = \frac{1}{K_\varepsilon} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0},$$

где $\Delta\lambda$ – изменение резонансной длины волны ВБР при внешнем воздействии, нм; ε – относительная деформация, отн. ед.; K_ε – коэффициент чувствительности ВБР к деформации, отн. ед.

Коэффициент K_ε определяется свойствами кварцевого стекла оптического волокна с ВБР (показателем преломления кварцевого стекла, коэффициентами Погеля упрягооптического тензора, коэффициентом Пуассона, коэффициентом теплового расширения кварцевого стекла), а также свойствами материала конструкции, в который интегрирован ВОД (коэффициентом теплового расширения ПКМ, коэффициентом Пуассона, технологическими параметрами формования ПКМ). В литературе [22, 23] используется значение K_ε , равное 0,78. Данное значение может быть незначительно скорректировано в процессе калибровки с учетом особенностей конкретного ПКМ, в который интегрируется ВОД.

Качество проектирования и технологического воплощения является определяющим при проведении механических испытаний системы встроенного контроля на основе ВОД в составе композитных конструкций. На рис. 5 представлены результаты испытаний монолитного образца из углепластика Porcher арт. 3338/BC-2526к на растяжение в сравнении с данными навесного экстензометра.

Рис. 5. Сравнение данных ВОД и средств классической тензометрии

На данном рисунке представлены результаты нагружения образца в упругой зоне. С увеличением нагрузки выше предела пропорциональности (обычно выше 0,5 от разрушающей нагрузки) расхождение с данными средств классической тензометрии (экстензометра и тензо-

датчика) может увеличиваться до 5 % в зависимости от геометрии образца и схемы армирования. При испытаниях на растяжение монолитных и трехслойных образцов показания интегрированных ВОД несколько выше, так как исключается внешнее клеевое соединение тензодатчика, обладающее дополнительным коэффициентом передачи деформации, приводящим к ошибкам при измерениях. При испытаниях на сжатие как монолитных, так и трехслойных образцов происходят множественные расслоения, местная, а потом и общая потеря устойчивости образца, при этом показания интегрированного ВОД будут с большей степенью вероятности ниже, чем у наклеенного тензодатчика. Таким образом интегрированные ВОД, являясь частью материала конструкции, отражают фактическое состояние конструкции без поправки на внешние клеевые соединения, регистрируя деформацию непосредственно в локальной зоне своего расположения.

ВОД сохраняют свою способность регистрировать деформации как при испытаниях на малоцикловую усталость (МЦУ) на базе 10^4 циклов, так и на ресурс на базе 10^6 циклов, что подтверждается комплексом испытаний на различных ПКМ, перерабатываемых автоклавными и безавтоклавными методами формования. Интегрированные ВОД также позволяют регистрировать факт и локальную зону ударного воздействия на материал конструкции, при этом точность локализации удара составляет величину порядка 100–150 мм в зависимости от типа материала и интенсивности ударного воздействия.

Применение ВОД актуально при создании систем внешнего мониторинга и встроенного контроля изделий авиационной техники из ПКМ (перспективные самолеты гражданского и двойного назначения – крылья, фюзеляж, мотогондола, высоконагруженные композитные элементы двигателя, стабилизатор, воздушный тормоз, хвостовое оперение), вертолетов (лопасти, фюзеляж), изделий космической и ракетной техники (сосудов высокого давления, корпусов двигателей на твердом топливе), объектов строительной инфраструктуры (здания, мосты, коллекторы в том числе с композитным усилением), транспортной инфраструктуры (трубопроводы, газопроводы), атомной промышленности и т.д.

Одним из перспективных направлений внедрения ВОД является их размещение в композитных подложках защитных вставок в средствах индивидуальной защиты военнослужащих. ВОД обладают спо-

способностью определять факт попадания пуль и осколков в защитные структуры, оценивать величины деформаций, по величине которых можно судить о степени запреградных контузионных травм, т.е. косвенно оценивать боеспособность военнослужащего в режиме реального времени.

В качестве новой области применения ВОД также следует выделить композитные подложки защитных вставок в средствах индивидуальной защиты военнослужащих, сотрудников полиции и спецподразделений (рис. 6).

Рис. 6. Характерные тыльные деформации при непробитии образцов многослойной брони средством поражения (пуля Б-32 патрона 7-БЗ-3)

Как известно, современные подложки под лицевой керамический слой, обладающий высокой твердостью, изготавливают из арамидных тканей (сухих, частично пропитанных или пропитанных с градиентом по толщине подложки), из волокнистого сверхвысокомолекулярного полиэтилена (см. рис. 6), а также из комбинации вышеуказанных материалов [24, 25]. Обладая высокой баллистической энергоемкостью, подложки обеспечивают поглощение кинетической энергии индентора, недопущение выхода фрагментов сердечника и лицевого керамического слоя по тыльной поверхности брони, способствуют снижению весовых характеристик изделия в сравнении с аналогичными решениями на основе броневого сталя, титана и алюминиевых сплавов [26].

Одной из важнейших задач при разработке современных средств защиты является обеспечение защищенности бойца во время боевых действий, обеспечение управляемости подразделениями и контроля

состояния отдельных военнослужащих в режиме реального времени с командного пункта. Современная нормативная база в части разработки средств защиты, в частности ГОСТ 50744–95, классифицируя классы защиты применительно к различным средствам поражения, также лимитирует предельно допустимые уровни заброневой контузионной травмы, что связано с тем, что деформация средства защиты с внутренней стороны приводит к удару по телу бойца даже в случае, если средство поражения не обеспечило сквозного пробития брони.

Заброневая контузионная травма классифицируется по четырем уровням (приложение Б, табл. Б1 к ГОСТ 50744–95), в каждом из которых имеются характерные признаки поражения, времени потери боеспособности бойца, сроки и вероятность его возвращения в строй. Внедрение системы ВОД в тыльные слои защитных конструкций позволит в режиме реального времени регистрировать факты поражения брони пулями и осколками, оценивать запреградную деформацию и величину контузии. Информация, собираемая средствами регистрации с помощью современных систем, например ГЛОНАСС, может быть передана на командный пункт в различных форматах (рис. 7).

Рис. 7. Структурная схема функционирования системы встроенного контроля

Предлагаемый принцип работы заключается в следующем. В тыльные слои панелей из баллистического полиэтилена или арамида на этапе производства интегрируются ВОД. При этом для сбора дан-

ных от датчиков необходимо применение портативного интеррогатора с необходимой частотой опроса, разработка которого является дополнительной актуальной задачей. При возникновении баллистического воздействия ВОД позволят определять значения деформаций тыльных слоёв защитной конструкции, в том числе максимальные и остаточные. На основании данных ВОД рассчитываются величины перемещений тыльных слоёв с учетом толщины бронепанели и ее габаритных размеров. По величине перемещений определяется величина запреградной контузионной травмы в соответствии с ГОСТ 50744–95. Далее информация с интеррогатора через систему спутниковой связи ретранслируется на пункт управления с указанием текущей оценки состояния бойца, что проиллюстрировано на данном рисунке.

Стоит заметить, что представленные на рис.6 тыльные выпучины после воздействия пуля Б-32 патрона 7-БЗ-3 имеют размер более 22 мм, что свидетельствует о III степени запреградной контузионной травмы, приводящей к потере боеспособности бойца и требующей его эвакуации из района боевых действий, несмотря на то, что структура бронепанели обеспечит непробитие. В соответствии с III степенью запреградной контузионной травмы классифицирующие морфологические признаки травмы следующие: закрытые и открытые переломы ребер, разрывы плевры, кровоизлияния в ткань легких, кровоизлияния под оболочки сердца, под капсулу внутренних органов брюшной полости и забрюшинного пространства, субсерозные кровоизлияния в кишечнике, разрывы брыжейки, ограниченный гемопневмоторакс, гемоперитонием, переломы отростков позвонков без повреждения спинного мозга. Очевидно, что боец с такими травмами нуждается в оказании срочной медицинской помощи, и информация о его состоянии будет актуальной. Таким образом, можно резюмировать, что регистрация тыльных деформаций системой ВОД, ее обработка и передача на пункт управления значительно повысят выживаемость личного состава и боеспособность подразделения в целом.

Основные выводы

– В мире развернуты широкомасштабные исследования по созданию «умных» конструкций на основе ПКМ, в том числе с применением ВОД.

– Первым этапом на пути создания подобных конструкций является разработка систем встроенного контроля технического состояния.

– Определены технические требования к размещению ВОД в композитных конструкциях на этапе проектирования, отработаны экспериментальные технологии интеграции.

– Проведены испытания, подтверждающие эффективность применения ВОД при статических и ресурсных нагрузках.

– Разработка систем диагностики состояния бронезащиты является актуальной перспективной междисциплинарной задачей, лежащей в области волоконной оптики, материаловедения, прочности и ресурса конструкций из ПКМ.

– Внедрение ВОД в защитные конструкции позволит увеличить эффективность управления подразделениями и повысит контроль состояния каждого военнослужащего на поле боя.

– ВОД помогут определять степень тяжести поражения бойца, его способность вести бой или же необходимость эвакуации.

Кратко резюмируя всё вышеизложенное, стоит отметить, что применение ВОД в защитных композитных структурах является актуальным, перспективным и инновационным, требует решения большого количества технических и технологических задач как в части интегрирования ВОД и создания портативных интеррогаторов, так и в части ретрансляции показаний ВОД и их анализа, что требует широкой кооперации предприятий, работающих как в области разработки композитов и конструкций на их основе, так и в области создания перспективных волоконно-оптических систем мониторинга.

Список литературы

1. Epaarachchi J.A., Stevenson J., Canning M. Investigation of embedded near infrared fibre Bragg grating (FBG) sensors (830 nm) in structural health monitoring of glass fibre composite structures // 19th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-19); 15–18 Apr 2008. – Perth, Australia. DOI: 10.1117/12.786896

2. Optical fiber sensors for aircraft structural health monitoring / I. García, J. Zubia, G. Durana, G. Aldabaldetrekú, M. Asunción Illarrendi, J. Villatoro // Sensors. – 2015. – 15. – P. 15494–15519. DOI: 10.3390/s150715494.

3. Integrated system and methods for management and monitoring of vehicles: пат. 3096123 EP; опублик. 23.11.2016.

4. Structural health management architecture using sensor technology: пат. 2006/012266 WO; опубл. 02.02.2006.

5. Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms / H. Guo, G. Xiao, N. Mrad, J. Yao // *Sensors*. – 2011. – 11. – P. 3687–3705. DOI: 10.3390/s110403687

6. Исследование влияния ударных воздействий на спектральные характеристики оптоволоконных сенсоров на основе волоконных брэгговских решеток, интегрированных в полимерный композиционный материал / М.Ю. Федотов, А.М. Шиёнок, И.Н. Гуляев, С.А. Васильев, О.И. Медведков // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – № 4 (84). – С. 100–108.

7. Экспериментальные исследования по определению деформаций образцов из полимерного композиционного материала с применением волоконно-оптических датчиков / Н.А. Кошелева, Г.С. Шипунов, А.А. Воронков, Н.П. Меркушева, А.А. Тихонова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2017. – № 50. – С. 26–35.

8. Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций / А.Н. Серьёзов, А.Б. Кузнецов, А.В. Лукьянов, А.А. Брагин // *Науч. вестник Новосиб. гос. техн. ун-та*. – 2016. – № 3 (64). – С. 95–105.

9. Композиционный бак для агрессивной жидкости повышенной живучести с волоконно-оптической матрицей: пат. 2305653 RU; опубл. 10.09.2007.

10. Федотов М.Ю. Концепции создания и тенденции развития интеллектуальных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 71–80.

11. Волоконно-оптические датчики для мониторинга коррозионных процессов в узлах авиационной техники (обзор) / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, И.М. Медведев, И.С. Шелемба // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 3 (48). – С. 26–34.

12. Михайловский К.В., Базанов М.А. Измерение остаточных технологических деформаций в углепластике путем внедрения в него волоконных брэгговских решеток // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2016. – № 2 (142). – С. 54–58.

13. 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 // *Polymer Science. Series D.* – 2011. – Т. 4, № 3. – P. 246–251.

14. Михайловский К.В., Базанов М.А. Измерение остаточных технологических деформаций в углепластике путем внедрения в него волоконных брэгговских решеток // *Конструкции из композиционных материалов.* – 2016. – № 2 (142). – С. 54–58.

15. Федотов М.Ю., Бухаров С.В., Мухаметов Р.Р. Исследование защитных покрытий волоконно-оптических сенсоров, предназначенных для интеграции в полимерные композиционные материалы // *Конструкции из композиционных материалов.* – 2017. – № 4 (148). – С. 61–67.

16. Защитное покрытие для волоконно-оптических датчиков / Р.Р. Мухаметов, К.Р. Ахмадиева, И.С. Деев, В.В. Махсидов // *Упрочняющие технологии и покрытия.* – 2016. – № 9 (141). – С. 29–34.

17. Исследование границы раздела полимерных матриц с оптическими световодами в информкомпозитах / М.Ю. Федотов, А.М. Шиенок, Р.Р. Мухаметов, И.Н. Гуляев // *Вопросы материаловедения.* – 2017. – № 1. – С. 155–168.

18. Особенности интеграции оптоволоконных сенсоров в трехслойные композитные детали / М.Ю. Федотов, Н.Ю. Бейлина, А.Р. Гареев, С.А. Хижняк // *Тез. докл. Междунар. конф. молодых ученых, работающих в области углеродных материалов.* – М., Троицк, 2017. – С. 143–144.

19. Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Мониторинг конструкций из ПКМ оптоволоконными сенсорами // *Композиционные материалы в промышленности» (СЛАВПОЛИКОМ): материалы XXXIII Междунар. ежегод. конф. и блиц-выставки.* – Крым, 2013. – С. 205–206.

20. Experimental method of temperature and strain discrimination in polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on femtosecond-inscribed FBGs / V.V. Shishkin, V.S. Terentyev, D.S. Kharenko, A.V. Dostovalov, A.A. Wolf, V.A. Simonov, M.Yu. Fedotov, A.M. Shienok, I.S. Shelemba, S.A. Babin // *Journal of Sensors.* – 2016. – Т. 2016. Article ID 3230968. – 6 p. – URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3230968>.

21. Fiber-optic sensors based on FBGs with increased sensitivity difference embedded in polymer composite material for separate strain and temperature / V.V. Shishkin, V.S. Terentyev, D.S. Kharenko, A.V. Dostovalov, A.A. Wolf, V.A. Simonov, M.Yu. Fedotov, A.M. Shienok, I.S. Shelemba, S.A. Babin // *Measurements Transforming the Future of In-*

frastructure through Smarter Information: Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction, ICSIC 2016. – P. 75–79.

22. Fiber Grating Sensors / A.D. Kersey, M.A. Davis, H.J. Patrick, M. LeBlanc, K.P. Koo, C.G. Askins, M.A. Putnam, E.J. Friebele // IEEE J. Lightwave Tech. – 1997. – № 8. – Vol. LT-15. – P 1442–1463.

23. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах / Е.Н. Каблов, Д.В. Сиваков, И.Н. Гуляев, К.В. Сорокин, М.Ю. Федотов, Е.М. Дианов, С.А. Васильев, О.И. Медведков // Все материалы: энциклопед. справочник. – 2010. – № 3. – С. 10–15.

24. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В.А. Григорьев, И.Ф. Кобылкин, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков. – М.: Радиософт, 2008.

25. Маринин М.В., Хромушкин В.А. Определение характеристик энергоемкости защитных конструкций на основе текстильной брони при баллистическом ударе // VII Харитоновские тематические научные чтения: сб. тез. докл. – Саров, 2005. – С. 239–241.

26. Харченко Е.Ф., Ермоленко А.Ф. Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы. Т. 1: Механизмы взаимодействия с баллистическими поражающими элементами. – М., 2013. – 294 с.

Получено 12.11.17