

УДК 620.1:681.785.5

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-90-94

К.В. Сорокин¹, В.В. Мурашов¹**МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ (ОБЗОР)***

Рассмотрены мировые тенденции развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем. Исследованы направления развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем и способы обработки информации от них.

Ключевые слова: *оптоволоконный сенсор, информкомпозит, интеллектуальный полимерный композиционный материал, волоконная брэгговская решетка, распределенные оптоволоконные системы, квазираспределенные оптоволоконные системы.*

Global trends in development of distributed fiber-optic sensor systems were considered. Directions of development of distributed fiber-optic sensor systems and processing methods of information collected from them were investigated.

Keywords: *fiber-optic sensor, informcomposite, smart polymer composite, fiber Bragg grating, distributed fiber-optic systems, quasi-distributed fiber-optic systems.*

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

*В работе принимал участие А.М. Шиенок.

В качестве сенсорных элементов в системах встроенного контроля до настоящего времени использовались электрические, пьезоэлектрические, акустические, тепловые, электромагнитные и другие датчики, закрепляемые в различных точках контролируемой конструкции [1–3]. Качество крепления датчиков, наличие высокого уровня шумов и вибрации во время полета, сильные электромагнитные поля, дополнительная масса делали системы встроенного контроля на прикрепляемых датчиках крайне ненадежными. В связи с этим встал вопрос об использовании сенсорных элементов, внедренных в материал, из которого изготавлилась контролируемая конструкция [4–6]. В этом случае появляется возможность существенно снизить зависимость сигнала датчика от шумов и вибраций. Таким образом, появляется новый класс материалов – интеллектуальных материалов, обладающих сенсорными функциями, реагирующими на изменения внешних воздействий – нагрузок, температур и т. д. Для получения общей информации о процессах, протекающих в материале, из которого изготавливается конструкция, лучше всего применять распределенные системы оптических сенсоров [7–11].

Наиболее интенсивные разработки в области распределенных оптоволоконных систем проводятся в США. Среди разработок американских ученых следует отметить такие компании и институты, как The Boeing Company, Jerry Gene Williams, The Board of Trustees of the Leland Stanford Junior University, которые занимаются разработкой волоконно-оптических сенсоров, интегриро-

ванных в структуру материала или размещенных на его поверхности. Отличительной особенностью таких разработок является использование массивов сенсорных элементов для контроля состояния материала. Использование системы сенсоров позволяет увеличить зону контролируемого участка, а введение оптического волокна в структуру материала защищает это волокно от внешних механических повреждений. В частности, компанией The Boeing Company для определения уровня и местоположения повреждений предлагается использовать систему, состоящую из актюаторов и сенсорных элементов. В качестве сенсоров рассматривается возможность использования оптоволоконных сенсорных элементов различного типа, в том числе и распределенных, где само оптическое волокно на всем его протяжении представляет собой непрерывный распределенный чувствительный элемент. Информацию о распределении деформации получают при анализе сигнала обратного рассеяния во временном или частотном представлениях. Для определения деформаций в каждой точке оптического волокна используются принципы импульсной оптической рефлектометрии (OTDR – Optical Time Domain Reflectometry): рассеяние может происходить на неоднородностях материала (Рэлеевское рассеяние), акустических волнах (рассеяние Мандельштамма–Бриллюэна – иначе Бриллюэновское рассеяние), молекулярных колебаниях (комбинационное – иначе Рамановское рассеяние).

Разработчик Jerry Gene Williams предложил способ мониторинга напряженно-температурного

состояния длинных тонких конструкций из металла и композиционного материала, подвергнутых динамическим нагрузкам под воздействием воды и ветра, с использованием оптоволоконной техники. Учеными из The Leland Stanford Junior University предложено использовать диагностический слой, содержащий сеть датчиков и проводов, которые могут быть размещены на поверхности материала либо интегрированы в структуру композиционных, металлических и ламинированных материалов для мониторинга состояния структуры материала. Описываются также методы обнаружения структурной целостности композиционных и металлических материалов.

Учеными фирмы Qogex LLC описывается волоконно-оптическая система мониторинга напряженно-температурного состояния, включающая два оптических источника, генерирующих два световых сигнала на разных длинах волн для получения отклика на основе Бриллюэновского эффекта. Такая схема опроса сенсорных элементов в распределенной системе позволяет произвести разделение температуры и напряжений в оптическом волокне. Разработчиками из Fiber Optic Systems Technology Inc. был предложен способ мониторинга крупногабаритных конструкций путем спектрального анализа на основе Бриллюэновского эффекта. Используя анализ Бриллюэновского рассеяния спектра в оптическом волокне, возможно измерение деформации, перемещения, температуры или других физических величин в любом месте вдоль оптического волокна, прилегающего к материалу.

В журнале Optics Letters опубликована статья «Interrogation of fiber grating sensor arrays with wavelength – swept fiber laser» авторов S.H. Yun, D.J. Richardson, B.Y. Kim [12], в которой описывается использование пиков длин волн волоконного лазера в волоконных решетках Брэгга и применение массивов датчиков. Лазер обеспечивает высокую мощность сигнала – более 3 мВт со спектральным разрешением менее 0,1 нм на протяжении ширины диапазона, равной 28 нм. Использование временных интервалов демонстрирует статодинамические измерения деформаций с высокой точностью при частоте дискретизации 250 Гц. Представляет также интерес публикация «Multi dimensional strain field measurements using fiber optic grating sensors» авторов E. Udd, W. Schulz, J. Seim and E. Naugse в журнале Proceedings of SPIE, в которой рассматриваются волоконно-оптические датчики с решетками, записанными с помощью поляризованного оптического источника. Данные датчики могут быть использованы для мониторинга многомерных полей напряжений в композиционных материалах. В статье «Strain measurements using an interferometrically interrogated embedded fibre optic rosette» автора K. Levinetal, опубликованной в журнале SPIE, описывается способ мониторинга состояния кон-

струкций из ПКМ, в частности углепластика, с помощью встроенных оптоволоконных сенсоров, сконфигурированных в розетки. Одна такая розетка состоит из трех (как минимум) оптических сенсоров, ориентированных в различных направлениях, что позволяет более эффективно определять деформацию.

Среди европейских разработок, проводимых в ведущих странах: Англия, Франция, Германия, Швейцария, Испания, Италия, Люксембург, Норвегия, следует отметить компании Sensornet Limited, Moog Insensys Limited, Insensys Limited, European Community Represented by Commission of the European Communities, Smartec SA, Sercel, British Aerospace PLC, Optoplan As. В предложенных разработках рассматриваются различные способы реализации распределенных волоконно-оптических систем для встроенного контроля. В рассмотренных работах, помимо сенсорных систем, описываются системы сбора и обработки информации.

Английской компанией Sensornet Limited предложена распределенная система определения напряжения и температуры, позволяющая судить о состоянии материала. В структуру материала для измерения температуры и напряжения вводятся оптические волокна, опрашиваемые кратковременным импульсом света, посылаемым в волокно, с дальнейшим исследованием отраженного сигнала. Другой английской компанией Moog Insensys Limited предложено использовать волоконно-оптические сенсоры с компенсацией температуры. Массив волоконно-оптических датчиков деформации расположен в опорной панели в продольном направлении, и как минимум один из них расположен в зоне механической состыковки опорных панелей с датчиками. Учеными из компании Insensys Limited было предложено устройство и способ мониторинга изменений формы полой конструкции на основе оптических тензодатчиков. Компанией British Aerospace PLC описывается способ и оборудование для обнаружения трещин и определения напряжений в образцах с использованием распределенных систем на оптических волокнах и брэгговских решетках. Эта разработка служит для обнаружения трещин, определения скорости их роста, направления и уровня напряжений в определенной точке. Для этого предлагается использовать сеть оптических волокон с брэгговскими решетками, наклеенную на поверхность образцов.

Люксембургские разработчики из компании Commission of the European Communities предложили систему датчиков деформации с применением волоконных дифракционных решеток Брэгга в качестве чувствительных элементов. Это дало возможность контролировать напряженно-деформированное состояние на большей площади исследуемого объекта по сравнению с точечными датчиками на основе брэгговских решеток.

Швейцарской фирмой Smartec SA предложен длинномерный волоконно-оптический датчик деформации с распределенной связью, включающий по крайней мере один сенсорный блок, помещенный в защищающий материал. Данное решение позволяет осуществлять контроль напряженно-деформированного состояния готовой конструкции благодаря размещению такого датчика на ее поверхности.

Французской компанией Sercel представлено решение по мониторингу состояния композиционного материала, основанное на использовании массивов волоконно-оптических интерференционных сенсоров увеличенной плотности системы обработки сигнала от сенсоров, определяющей интерференционным методом разницу фаз исходного и полученного от сенсора сигналов. Одновременно возможно осуществление мультиплексирования и демultipлексирования интерферометрических волоконно-оптических датчиков (FOISs). Такая система включает средства для формирования оптического излучения, по крайней мере один чувствительный кабель, как минимум одну длинноволновую систему демultipлексирования и систему калибровки и позволяет одновременно использовать несколько оптических волокон в качестве оптических сенсорных систем.

Норвежской фирмой Optoplan AS предложена система распределенных оптических датчиков и топология массивов сенсоров. Оптические сенсоры под действием изгибных воздействий и вибраций могут их регистрировать. Данную систему разработчики рекомендуют использовать в различных областях инженерных сооружений, в частности в сейсмоопасных зонах.

Испанскими разработчиками из фирмы Airbus Espana SL предложен способ мониторинга появления и развития дефектов в конструкциях, выполненных из композиционных материалов, оптоволоконными сенсорами на основе брэгговских решеток. Среди итальянских разработчиков выделяется компания Finmeccanica S.P.A., которая совместно с американской компанией United Technologies Corporation разработала систему контроля деталей на основе встроенных или прикрепленных оптических сенсоров. Ими предлагается система мониторинга конструкций, включающая оптоволоконные сенсоры на брэгговских решетках, интегрированные или наклеенные на поверхность контролируемого объекта, и интеррогатор, осуществляющий сбор и обработку данных от сенсоров с определением температуры и деформации в статическом и динамическом режимах. Стоит упомянуть, что применяемые в вышеописанных разработках точечные сенсоры не в состоянии обеспечить контроль деформации на больших площадях. Стоит также отметить, что среди публикаций статей немецких ученых рассматриваются распределенные оптические системы. Так, в

статье «Analytical solution of four-mode couplign in shear strain loaded fiber Bragg grating sensors» авторов Mathias S. Müller, Hala J. El-Khozondar, Thorbjörn C. Buck and Alexander W. Koch, опубликованной в Optics Letters [13], описывается обработка информации от волоконных брэгговских решеток, которые реагируют на деформацию. Отличительной особенностью является использование поляризованных источников, работающих на разных модах оптического волокна.

Среди японских компаний стоит отметить фирму Fuji Jukogyo Kabushiki Kaisha (The University of Tokyo), которая имеет целый ряд интересных разработок. В частности, предлагается применять распределенные волоконно-оптические сенсорные системы не только для регистрации напряженно-деформированного состояния, но и для обнаружения ударных воздействий. Так, предложена система, которая включает прибор и оптические волокна с нанесенными на них точечными датчиками. Изменение длин волн группы сигналов, отраженных от этих датчиков, свидетельствует о воздействии вибраций от удара, распространяющихся в контролируемом объекте в виде упругих волн. Данная разработка позволяет регистрировать ударные воздействия, которые являются критичными для углепластиков. Предложен также способ выявления повреждений с использованием актюатора в качестве генератора акустических волн Лэмба и оптоволоконных сенсоров на основе брэгговских решеток. Достоинством этой системы является возможность определения повреждений без воздействия внешних нагрузок, что может быть актуальным при проведении плановых проверок состояния летательного аппарата (ЛА). Ими также предложена система обнаружения удара, содержащая три или более волоконно-оптических датчика, находящихся в различных положениях. Данная разработка позволяет производить исследование материала на воздействие внешних нагрузок одновременно в разных направлениях.

Японские разработчики отличаются от разработчиков других стран тем, что используют оборудование только собственного производства. В статье «Strain monitoring of a single lap joint with embedded fiber-optic distributed sensor» авторов Hideaki Murayama, Kazuro Kageyama, Kiyoshi Uzuwa, Kohei Ohara, Hirotaka Igawa, опубликованной в журнале Structural Health Monitoring за май 2012 г. [14], описано применение распределенных волоконно-оптических датчиков, позволяющих измерять деформации, распределенные вдоль волокна с брэгговскими решетками, что обеспечивает высокое пространственное разрешение.

Среди других азиатских разработчиков следует выделить фирмы Кореи – Korea Inst Science Technology, Lee Geumsuk; Сингапура – Swee Chuan Tjin; Тайваня – National Chiao Tung University. В их разработках предлагаются различные

варианты волоконно-оптических сенсорных систем с оригинальным геометрическим расположением сенсорных элементов, позволяющим дифференцировать значение нагрузки и температуры. Так, корейской фирмой Korea Inst Science Technology предложено оборудование для контроля вращающихся тел. Оптическое волокно с массивом брэгговских решеток наматывают на поверхность тела вращения по спиралевидной траектории. Это позволяет контролировать неравномерность момента вращения и возникающих деформаций. Разработчиками сингапурской фирмы Swee Chuan Tjin предложен датчик, который может использоваться как датчик нагрузки, не зависящий от колебаний температуры, а также как датчик для регистрации изменения температуры материала.

Сотрудниками тайваньского университета National Chiao Tung University предложено несколько разработок. Способ использования волокна для одновременного измерения распределенных напряжений и температуры материала основан на смещении оптической дисперсии в волокне, находящемся в сложной структуре материала с разными температурными коэффициентами (Бриллюэновский эффект изменения частоты спектра в оптическом волокне под действием различных внешних факторов). Предложен также способ построения высокоразрешающей волоконной оптической системы с линейным резонатором для определения с высокой точностью с помощью брэгговских решеток температуры. С помощью электрооптического переключателя возможно применение массива сенсоров. Применение описанных разработок совместно с распределенными сенсорными системами позволит учесть температурную составляющую при измерении напряженно-деформированного состояния материала в конструкции.

Из литературных источников видно, что китайские ученые также проводят разработки в данном направлении. Так, в журнале SPIE от 4 октября 2012 г. опубликована статья «Recent progress in

distributed optical fiber raman sensors» авторов Zaixuan Zhang, Shangzhong Jin, Jianfeng Wang, Yi Li, Huaping Gong, Xiangdong Yu, Honglin Liu, Yongxing Jin, Juan Kang, Chenxia Li, Wensheng Zhang, Zhongzhou Sun, Chunliu Zhao, Xinyong Dong [15], в которой описываются исследования ученых из China Jiliang University (CJLU) по производству и применению распределенных волоконных датчиков на основе Рамановского рассеяния. Проводимые работы направлены на улучшение измерения расстояния, точности, пространственного разрешения, способности многопараметрических измерений распределенных систем оптоволоконных датчиков, технологий создания нового поколения волоконных датчиков, основанных на оптическом волокне и нелинейных принципах рассеяния.

Стоит также упомянуть о совместной статье «Distributed Fiber-Optic Intrusion Sensor System» ученых из разных стран – Juan C. Juarez, Eric W. Maier, KyooNamChoi, and Henry F. Taylor [16], опубликованной в Journal of Lightwave Technology. В ней описывается применение распределенной системы оптических датчиков для обнаружения и локализации деформаций, вызванных внешними воздействиями. Чувствительный элемент – одномодовый оптоволоконный телекоммуникационный кабель, заложный по периметру охраняемого объекта.

Среди российских разработчиков следует отметить ФГУП «ВИАМ» и ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина». В рассмотренных разработках предлагается использовать массивы волоконно-оптических сенсоров, позволяющих производить контроль деформации и температуры полимерных и металлополимерных композиционных материалов путем изменения длин волн волоконных брэгговских решеток, а также регистрировать повреждение материала по разрушению оптического волокна. Анализируя российские охраняемые документы, можно судить о значительном техническом отставании отечественных исследований от зарубежных разработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Гуляев И.Н., Гуняев Г.М., Раскутин А.Е. Полимерные композиционные материалы с функциями адаптации и диагностики состояния //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 242–253.
3. Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В. и др. Особенности создания полимерных композиционных материалов с интегрированной активной электромеханической актуаторной системой на основе пьезоэлектриков //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 31–34.
4. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. и др. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. №3. С. 10–15.
5. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. и др. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
6. Kablov E.N., Sivakov D.V., Gulyaev I.N. et al. Application of optical fiber as strain gauges in polymer compo-

- site materials //Polymer Science. Series D. 2011. V. 4. №3. P. 246–251.
7. Сорокин К.В., Мурашов В.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Прогнозирование развития дефектов в конструкциях из ПКМ способом определения изменений жесткости при активировании материала //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 20–22.
 8. Федотов М.Ю. Будущее – за композитами с интеллектом //Инженерная газета. 2012. №9–10.
 9. Федотов М.Ю., Сорокин К.В., Гуляев И.Н., Шиенок А.М. Изменение геометрического профиля – инновационное решение для аэродинамики //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 55–57.
 10. Гончаров В.А., Шиенок А.М., Сорокин К.В. и др. Возможности сенсорных систем и интеллектуальных ПКМ на их основе //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №2. С. 18–23.
 11. Гончаров В.А., Шиенок А.М., Сорокин К.В. и др. Моделирование инфузионных технологий изготовления слоистых полимерных композиционных материалов //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №1. С.43–49.
 12. Seok Hyun Yun, Richardson D.J., Byoung Yoon Kim. Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser //Optics Letters. 1998. V. 23. №11. P. 843–845.
 13. Müller M.S., El-Khozondar H.J., Buck T.C., Koch A.W. Analytical solution of four-mode coupling in shear strain loaded fiber Bragg grating sensors //Optics Letters. 2009. V. 34. №17. P. 2622–2624.
 14. Murayama H., Kageyama K., Uzawa K. et al. Strain monitoring of a single lap joint with embedded fiber-optic distributed sensor //Structural Health Monitoring. 2012. V. 11. №3. P. 325–344.
 15. Zaixuan Zhang, Shangzhong Jin, Jianfeng Wang et al. Recent progress in distributed optical fiber raman sensors //SPIE 8421, OFS2012 22-nd International Conference on Optical Fiber Sensors, 84210L (October 4, 2012); doi:10.1117/12.981387.
 16. Juarez J.C., Maier E.W., Kyoo Nam Choi, Taylor H.F. Distributed Fiber-Optic Intrusion Sensor System //Journal of Lightwave Technology. 2005. V. 23. №6. P. 2081–2083.