

УДК 620.1:681.785.5

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-71-80

М.Ю. Федотов¹**КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ
РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ОБЗОР)**

Рассмотрены концепции создания интеллектуальных материалов. Обобщен отечественный и мировой опыт создания интеллектуальных полимерных композиционных материалов с оптоволоконными системами встроенного контроля напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: интеллектуальный материал, интеллектуальный полимерный композиционный материал, деформация, напряженно-деформированное состояние, сенсор, оптоволоконный сенсор.

Concepts of creation of smart materials are considered. The domestic and world experience of creation of smart polymer composite materials with fiber-optic systems of built-in control of stress-strain state is summarized.

Keywords: smart material, smart polymer composite material, deformation, stress-strain state, sensor, fiber-optic sensor.

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

Введение

Основные принципы создания современных материалов для сложных технических систем основываются на результатах фундаментальных и фундаментально-ориентированных исследований и базируются на следующем постулате: неразрывность материалов, технологий и конструкций [1], включая использование «зеленых» технологий при создании материалов и комплексных систем защиты, а также реализацию полного жизненного цикла с использованием IT-технологий – от создания материала до его эксплуатации в конструкции, диагностики, ремонта, продления ресурса и утилизации. Для сравнения – в США с 1993 г. введена в действие предложенная Президентом многолетняя общенациональная «Программа по перспективным материалам и их обработке», ориентированная на разработку перспективных материалов для новой техники.

Анализ тенденций развития материалов в мире показывает, что одним из наиболее актуальных направлений развития современного материаловедения является концепция создания интеллектуальных материалов (ИМ) и конструкций на их основе, обладающих комплексом функций, обеспечивающих своевременную реакцию на изменение условий окружающей среды и внешние воздействия [2–7]. Создание ИМ стало возможным благодаря бурному развитию информационных технологий и сенсорной техники. Сенсоры – это те устройства, в которых происходит процесс «рождения информации» и в которых физико-химические изменения, происходящие в режиме реального времени, превращаются в информационные сигналы, служащие основой для разумного поведения, для формирования и уточнения моде-

лей действительности. Именно от сенсоров и начинается любое разумное поведение, всякий интеллект, вся информатика. Любая разумная система, возникшая естественным путем или созданная другой разумной системой, успешно функционирует и выживает в реальном мире до тех пор, пока она получает объективную и качественную информацию о нем [8].

Разработка интеллектуальных полимерных композиционных материалов (ИПКМ) позволяет расширить спектр свойств классических полимерных композиционных материалов (ПКМ) благодаря функциональным компонентам, наделяющим материал способностью своевременно регистрировать, приспосабливаться и адекватно реагировать на постоянно изменяющиеся нагрузки, температуры и другие факторы в режиме реального времени, сохраняя свою работоспособность в процессе эксплуатации [9]. Материалы нового поколения будут обладать ярко выраженной анизотропией свойств в зависимости от назначения и могут использоваться при создании сложных технических систем.

Характерным признаком таких материалов является наличие в них интегрированных сенсоров, актюаторных, вычислительных или управляющих устройств и систем. Управляющие устройства проектируются, настраиваются и программируются с учетом требований к конструкции, условий ее эксплуатации и свойств основного конструкционного материала, конструктивно-технологических факторов, дефектов микроструктуры и др. Хотя ИПКМ могут быть использованы при строительстве зданий и сооружений, в конструкциях мостов, трубопроводов, судов, транспортных средств, основные направления совре-

менных исследований касаются авиационно-космических приложений: создания перспективных самолетов, ракет, больших космических конструкций различного назначения и др.

Концепции интеллектуальных материалов

В научно-технической литературе описаны различные концепции и научные подходы, определяющие развитие направления «Интеллектуальные материалы» [10, 11].

Американская концепция интеллектуальных материалов

Отличительной особенностью американского подхода является так называемая «система конструкций», предлагающая упорядочить все разнообразие и схожесть функций различных конструкций с элементами систем управления, используя теорию множеств. Согласно этой теории любые два пересекающихся множества, характеризующиеся различными отличительными и подобными признаками, образуют третье множество, обладающее одновременно и теми и другими признаками. Данное множество может содержать одно или несколько вложенных множеств – подмножеств, характеризующихся другими отличительными признаками. Таким образом, строится иерархическая структура. Согласно американской концепции, конструкции с функциональными компонентами и элементами систем управления можно разделить на адаптивные и чувствительные. Под адаптивными понимаются конструкции, в составе которых есть исполнительные устройства, дающие возможность изменять состояние или характеристики системы в определенном направлении. Чувствительные конструкции имеют в своем составе сенсоры, реагирующие на изменения в конструкции, обусловленные воздействием внешних факторов, определяющие ее состояние или характеристики. Очевидно, что конструкции, обладающие адаптивностью и чувствительностью, являются управляемыми, т. е. имеют в своем составе как сенсоры, так и исполнительные устройства, входящие в систему управления с обратной связью, позволяющую активно управлять состоянием или характеристиками конструкции. В свою очередь, подмножеством управляемых конструкций являются активные конструкции, имеющие в своем составе и сенсоры, и актюаторные элементы, интегрированные в основную конструкцию, выполняющие одновременно конструктивную и управленческую функцию. Совместная интеграция конструктивных и управляющих элементов приводит к созданию гибридных активных конструкций, дальнейшее развитие которых приводит к выделению среди них интеллектуальных конструкций, характеризующихся высокой степенью интеграции сенсорных, актюаторных, логических схем управления, формирующих систему распределенного иерархического встроенного контроля.

Описанная классификация умных конструкций на основе ИМ достаточно условна и субъективна, но вместе с тем позволяет осмыслить и упорядочить наши представления по этому вопросу.

Японская концепция интеллектуальных материалов

Концепция японских ученых принципиально отличается от американского подхода. Она основывается преимущественно на материаловедческом фундаменте, а не на базе систем конструкций. Согласно этой точке зрения историческое развитие материаловедения идет в направлении от конструкционных материалов к функциональным материалам. Основываясь на данном представлении, в будущем необходима разработка гиперфункциональных материалов, по своим возможностям равных или превосходящих живые организмы; природа – источник идей для создания новых синтетических материалов, способных реализовать, например, адаптивные функции, присущие биологическим материалам, и превзойти их по ряду интеллектуальных признаков, соответствующих различным категориям разумности.

Таким образом, в научном мире пока нет единого мнения о том, как называть это новое направление развития материалов и конструкций, однако большинство исследователей пришли к единому мнению, что интеллектуальные материалы нового поколения и конструкции на их основе должны включать в себя распределенные интегрированные сенсорные системы регистрации внешних и внутренних воздействий, логические схемы и микропроцессорные устройства, принимающие решение при наступлении того или иного события, а также актюаторные системы, осуществляющие непосредственное механическое управление «умной конструкцией» после принятия решения о наступлении данного события.

Вместе с тем японские эксперты выделяют следующие приоритетные направления практического применения ИМ:

- ПКМ с оптоволоконными сенсорами;
- многослойные пьезоэлектрические силовые приводы;
- пьезоэлектрические вибрационные гироскопы;
- высокочастотные ультразвуковые сенсоры;
- ПКМ с эффектом памяти формы;
- химические и биологические детекторы.

Основными разработчиками подобных материалов являются фирмы Mitsubishi Heavy Industries и Fuji Heavy Industries, которые занимают одну из лидирующих позиций в мире в области разработки и испытаний элементов летательных аппаратов (ЛА), изготовленных из интеллектуальных конструкционных материалов нового поколения на основе углеродного волокна. В состав их внутренней структуры интегрированы оптоволоконные сенсоры, выполняющие также роль линий передачи данных, объединенные в локальную сеть и

подключенные к процессорам обработки данных. При возникновении механических дефектов в зоне расположения оптоволоконного кабеля изменяются его оптические характеристики, что позволяет автоматически регистрировать место, характер и масштабы повреждений. Фирмой Fuji Heavy Industries также разработан наноконпозиционный материал с покрытием из сплава с памятью формы, который может самостоятельно восстанавливаться при пропускании через этот слой слабого электрического тока. Материал нашел практическое применение в корпусных конструкционных узлах ЛА. Одним из высокотехнологичных достижений в области ИМ является разработка шумопоглощающих панелей для внутренней обшивки салонов пассажирских авиалайнеров со встроенными пьезоэлектрическими элементами, способными уменьшить уровень вибраций на 30% и снизить уровень шума в салоне с 91 до 87 дБ.

Мировой опыт создания интеллектуальных материалов

Анализируя данные из литературных источников и сети Интернет, стоит отметить, что работы в области создания ИМ на различных физических принципах и конструкций на их основе в разное время были получены такими организациями, как Air Force Systems Command, Air Force Aeronautical Lab., Wright Paterson AFB, Air Force Aeronautical Lab., The Army Research Office, ARPA, Naval Research Laboratory, Naval Air Development Center и др. – по линии Министерства обороны США, а также НАСА (Langley Research Center) и Министерства энергетики США. Работы по контрактам велись с крупными авиационно-космическими фирмами, в том числе McDonnell Douglas, Hughes Aircraft, Rockwell International, Boeing Company, TRW, Raytheon и др.

Наиболее интересны работы в области разработки, исследований и моделирования структуры и свойств ИМ с использованием САЕ инженерного анализа таких научных исследовательских центров, как Политехнический институт и Университет штата Вирджиния, Университет Буфало, Лаборатория реактивного движения, Калифорнийский технологический институт, Университет штата Пенсильвания, Стэнфордский университет, фирма Payload Systems Inc., Исследовательский центр НАСА в Лэнгли, Технологический институт штата Джорджия, фирма Litton-Itek Optical Systems, Advanced Structure Monitoring Inc. (США); Токийский университет, фирма Nissan Motor Co., Научно-технологический институт космоса и астронавтики (Канагава, Япония). Например, немецкими учеными из European Centre for Emerging Materials and Processes, Institute of Lightweight Engineering and Polymer Technology и Technical Universitet Dresden показана возможность создания ИМ на основе ПКМ с интегрированными активными системами демпфирования колеба-

ний (AVD) и мониторинга структурной целостности конструкции (SHM) [12–15]. Для этой цели был изготовлен прототип композитного ротора с интегрированными полупроводниковыми тензодатчиками и пьезоэлектрическими актюаторами. Согласно работе [16] существует пятиуровневая система, характеризующая повреждения конструкции: наличие, расположение, тип, величина и прогноз оставшегося срока службы (остаточный ресурс). Предложена модель второго уровня повреждения на основе анализа сигналов колебаний, генерируемых функциональными компонентами. Такая система позволяет в динамике отслеживать состояние конструкции, используя метод присоединенных масс, моделирующий дефекты конструкции. Исследования показали невысокое разрешение местоположения изменений конструкции в динамике, что обусловлено малым количеством интегрированных сенсоров.

Однако введение в структуру материала инородных компонентов приводит к образованию концентраторов напряжений и, как следствие, к снижению упруго-прочностных характеристик материала. Немаловажными факторами при выборе типа сенсора являются: электромагнитная совместимость с бортовыми приборно-техническими средствами, коррозионная стойкость, живучесть, сохранение работоспособности после воздействия климатических факторов, агрессивных жидкостей и других эксплуатационных условий. Таким образом, сенсорный элемент для введения в ПКМ необходимо выбирать с учетом минимизации влияния на свойства базового материала и обеспечения структурной, механической и химической совместимости с полимерными матрицами и армирующими наполнителями. Наиболее полно указанным критериям удовлетворяют оптоволоконные сенсоры, позволяющие с высокой точностью определять градиенты деформационных и температурных распределений в материале как в единой анизотропной гетерогенной системе.

ИПКМ на основе углепластиков с оптоволоконными сенсорами

(состояние научной проблемы на 2013 г.)

По состоянию на 2013 г. наиболее интенсивные разработки в области ИМ на основе углепластиков с оптоволоконными сенсорами проводятся в США, странах ЕС и Японии. Следует отметить активизацию изобретательской деятельности в странах восточного региона (Китае, Корее, Тайване и Сингапуре). Разработка отечественных информкомполитов для авиакосмической техники ведется в ВИАМ с 1995 г. В настоящее время основные материаловедческие направления, в которых проводятся исследования, – создание информкомполитов для силовых обшивок и конструктивных элементов планера самолета, разработка и исследование информкомполитов на основе углепластиков с интегрированными оптоволо-

конными системами мониторинга напряженно-деформированного состояния и электромеханическими актюаторными системами управления геометрией композитных конструкций [17–31].

Среди российских заявителей следует отметить разработки ВИАМ. Так, предложен способ мониторинга напряженно-температурного состояния конструкций, выполненных из полимерных и металлополимерных композиционных материалов, путем применения двух и более волоконно-оптических брегговских решеток, в том числе на одном или нескольких волоконно-оптических световодах, интегрированных в структуру композиционного материала в процессе изготовления [32]. Такой способ позволяет дифференцировать механические и тепловые деформации внутри конструкции, выполненной из полимерного и (или) металлополимерного композиционного материала, благодаря использованию решения системы уравнений, описывающих математическую модель конструкции и учитывающих значения реальных механических и тепловых деформаций брегговских решеток. Модель позволяет определять распределение механических и тепловых деформаций конструкции, в том числе в режиме реального времени. Указанный способ представляет собой эффект отражения оптического сигнала от массива брегговских решеток и последующий расчет значений механических нагрузок и температуры с учетом известной информации о свойствах материала конструкции и способа эксплуатации конструкции. Заслуживает внимания разработка ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина», где описывается устройство, содержащее семь V-образных волоконных световодов (сенсоров, которые расположены в зонах возможного появления трещин), три лазерных диода, три измерительных приемника оптического излучения, блок обработки фотозлектрического сигнала и блок обработки информации с программным обеспечением. Устройство используется для мониторинга трещинообразования в конструкциях ЛА, на которые наклеиваются отрезки оптических волокон в местах предполагаемого возникновения усталостных трещин. Уменьшение, а затем и полное пропадание оптического сигнала в волокнах свидетельствует о зарождении и развитии трещин в испытываемой конструкции [33].

Говоря о США, следует отметить, что в стране проводятся широкомасштабные исследования в области создания ИМ, в частности с оптоволоконными сенсорами, функционирующими на различных физических принципах.

Среди фирм-заявителей следует отметить The Boeing Company, Morgan Research Corporation, Luna Innovations Incorporated, McDonnell Douglas Corporation, United Technologies Corporation, Simula Inc. и Advanced Structure Monitoring Inc., имеющих целый ряд запатентованных разработок в

области применения сенсорных элементов различных типов, в том числе оптоволоконных, функционирующих на принципах дифракции, интерферометрии и импульсной оптической рефлектометрии, в составе ПКМ и конструкций на их основе с целью мониторинга состояния [34–44].

В частности, разработчиками The Boeing Company предлагается метод обнаружения поврежденных элементов конструкций ЛА путем применения актюаторных систем, генерирующих поверхностную акустическую волну, и сенсорных систем, в том числе на основе волоконных брегговских решеток (ВБР), регистрирующих искажение деформационных полей при возникновении повреждений. Подана заявка на систему встроенного контроля композитных конструкций на основе квазираспределенных оптоволоконных сенсоров.

Анализируя полученные из сети Интернет программы, выпускаемые агентством ВВС США [45, 46], можно отметить особое внимание к интеграции различных датчиков неразрушающего контроля параметров не только силовой части ЛА, но и планера (программа на 2007 год «Department of defense joint service specification guide. Engines, aircraft, turbine. JSSG-2007A») и программа на 2006 год «Department of defense joint service specification guide. Aircraft structures. JSSG-2006»). Довольно интересным документом, выпущенным американскими ВВС, является «MIL-HDBK-1530B (USAF)» [47] для проекта «Project 15GP-F061», в котором указываются все виды испытаний, которые должно пройти изделие. В данном документе также представлены в графической форме четыре программы структурной интеграции неразрушающего контроля. Интересным фактом является то, что это переработанный документ от 2002 г., и, как упоминают авторы, данный документ является открытым только для правительственных организаций.

Среди европейских компаний (Англия, Германия, Швейцария, Испания, Италия, Польша, Бельгия) следует отметить разработки [48–56] фирм Auxetix Limited (GB), Insensys Limited (GB), Airbus Operations GmbH (DE), EADS Deutschland GmbH (DE), Airbus Espana SL (ES), Sists Materiales de Sensados (ES), Finmeccanica S.P.A. (IT). Интересной представляется разработка компании Airbus Operations GmbH, заключающаяся в применении оптических волокон с ВБР для контроля скорости течения фронта связующего при изготовлении композиционного материала инфузионными методами формования, а также мониторинга напряженно-температурного состояния изготовленной конструкции в процессе эксплуатации. Стоит отметить также способ ремонта оптического волокна в составе композитной конструкции, предложенный компанией Airbus Espana SL, предусматривающий предварительную защиту локального участка оптического световода трубчатым кожухом. В случае обрыва оптического волокна под кожухом проводятся ремонтные ра-

боты, включающие удаление частей армирующих слоев, извлечение кожуха со сломанным оптоволоконном, сварку оптоволокон, замену кожуха и восстановление целостности материала в конструкции. Отдельно стоит выделить патент фирмы Insensys Limited на топологию оптоволоконных сенсоров на ВБР в составе лопасти несущего винта вертолета и способ определения деформаций в лопастях оптоволоконными сенсорами, введенными в процессе изготовления отдельных структурных частей вертолетной лопасти. В публикации итальянских разработчиков из фирмы Carlo Gavazzi Space предложен способ мониторинга состояния конструкций из керамических композиционных материалов авиационного и космического назначения с применением интегрированной оптоволоконной сенсорной системы на основе высокотемпературных брегговских решеток [57]. Заслуживает внимания статья «In-situ simultaneous strain and temperature measurement of adaptive composite materials using a fiber Bragg grating based sensor» авторов D.M. Costantini, V. Michaud и др., опубликованная в журнале SPIE, в которой описывается способ одновременного измерения деформации и температуры слоистых металлополимерных материалов с памятью формы в конструкции с помощью оптоволоконных сенсоров на брегговских решетках [58].

Среди японских заявителей наиболее интересны разработки компании Fuji Heavy Ind. Ltd. [59–62] в области мониторинга состояния композитных конструкций путем введения пьезоэлектрических актуаторных элементов, генерирующих акустические волны, создающие вибрацию конструкции, и оптоволоконных сенсоров, регистрирующих вибрационное воздействие. Кроме того, следует отметить совместную разработку [63] компаний Fuji Heavy Ind. Ltd. и Hitachi Cable – оптический сенсор, предназначенный для интеграции в конструкцию из композиционного материала с целью мониторинга ее состояния. Сенсор представляет собой оптический световод с нанесенной ВБР, концы которого снабжены коннекторами для подключения к опросному устройству, а зона ввода/вывода оптоволокон из материала защищена слоем тонкой пленки.

Среди других азиатских заявителей [64–71] следует выделить организации Китая: Univ. Tianjin Polytechnic; Кореи: Korea Inst. Science Technology, Ices Co. Ltd.; Сингапура: Agency for Science Technology and Research, Nanyang Technological University. Предложен способ введения оптического волокна с ВБР в процессе 3D-плетения армирующего наполнителя для последующей пропитки и формования конструкций из ПКМ. Показано повышение чувствительности сенсорных элементов и снижение влияния оптического волокна на механические свойства композита, изготовленного данным способом. Для компенсации температурного воздействия на интегрированный

в композиционный материал оптический сенсор деформации на основе дифракционной решетки предлагается в качестве фильтрующего элемента опросного устройства использовать чирпованную волоконную брегговскую решетку – ВБР с линейной частотной модуляцией. Большинство сингапурских разработок направлено на применение оптических световодов с нанесенными ВБР в качестве сенсорных элементов датчиков из композиционных материалов для регистрации и измерения напряженно-деформированного состояния конструкций. Кроме того, исследователями из компании Dept. of Aerospace Engineering предложен способ одновременного измерения деформации и температуры композитных элементов двумя брегговскими решетками, сформированными на одном оптическом волокне и интегрированными в материал [72].

Современные разработки информкомпозигов ставят проблемы высокой сложности и требуют привлечения больших финансовых, материальных и людских ресурсов. Это делает необходимыми объединение усилий исследовательских организаций различных областей знаний, промышленных фирм, а также высокую степень кооперации, в ряде случаев не только в рамках отдельной страны. Ярким примером такой кооперации является европейский проект SARISTU (Smart Intelligent Aircraft Structures) по разработке ИМ для конструкций авиационно-космического назначения. Координируемый компанией Airbus консорциум SARISTU объединяет 64 партнера из 16 европейских стран с общим бюджетом 51 млн € с частичным финансированием Европейской Комиссией в рамках программы FP7-ААТ-2011-RTD-1 (Соглашение о гранте №284562). Стартовав в сентябре 2011 г., проект, как ожидается, будет завершен к августу 2015 г.

Проект направлен на снижение стоимости авиаперевозок путем применения ИПКМ, содержащих в своем составе различные типы функциональных компонентов, объединенных в единую информационную сеть. В частности, совместная реализация передовых разработок в области сенсорики и микропроцессорной техники, а также интеграция деятельности в трех различных технологических областях (крыло с конформно изменяемой аэродинамической поверхностью (морфингом), мониторинг состояния композитных конструкций оптоволоконными сенсорами и многофункциональные структурные элементы с использованием наноусиленных смол) по прогнозам ученых повысят эксплуатационные характеристики самолета на 6% за счет снижения расхода топлива, в том числе необходимого для взлета, с одновременным снижением на 6 дБ производимого планером шума благодаря применению шумопоглощающих панелей на основе ИМ. Применение ИМ по оценкам экспертов фирмы Airbus обеспечит сокращение расходов на межполетные осмот-

ры ЛА на 1% за счет интеграции оптоволоконных систем мониторинга состояния, а включение углеродных нанотрубок в авиационные смолы позволит достичь экономии массы до 3%. Проект включает в себя более десяти НИОКР, в том числе реализуемый греческой фирмой Integrated Aerospace Sciences Corporation (INASCO) комплекс по разработке, оптимизации и внедрению волоконно-оптической системы мониторинга состояния элементов конструкций, а также оценке напряженно-температурного состояния и управлению форм-фактором композитных конструкций авиационного назначения (крыло, фюзеляж).

Одним из важных аспектов реализации данного проекта является оптимизация и внедрение волоконно-оптической системы мониторинга композитных конструкций. Система будет интегрирована в структуру крыла и фюзеляжа и должна предусматривать возможность измерения деформаций, возникающих в крыле и фюзеляже самолета в процессе эксплуатации. Установка данной системы на крыло позволит следить за формой задней кромки с конформным морфингом и деформацией при различных положениях кессона крыла, а на панели усиленного фюзеляжа определять и локализовать нарушение сцепления стрингера и обшивки. Система мониторинга будет интегрирована в композитную конструкцию в процессе производства и будет осуществлять мониторинг состояния сборочного узла на протяжении всего срока его службы. Для обеспечения качества производства композитных конструкций предлагается использовать систему мониторинга течения и отверждения связующего DIAMon Plus™ фирмы INASCO. Система состоит из диэлектрических датчиков, устанавливаемых на оснастке, датчиков расхода и термпар, интегрированных с инновационным, интерактивным и масштабируемым программным обеспечением. Снятие показаний с датчиков в режиме реального времени вместе с возможностью моделирования кинетики позволяет построить карту состояния материала, которая может быть использована для мониторинга, оптимизации и управления процессами полимеризации и отверждения [73].

Обеспечение безопасности полетов – одно из основных требований, предъявляемых к изделиям авиационной техники. Принципиально новый путь повышения безопасности и надежности эксплуатации авиационной техники – это применение информкомполитов на основе углепластиков [74].

Первым этапом «интеллектуализации» ИПКМ является создание систем встроенного контроля напряженно-деформированного состояния материала в конструкции. Под встроенным неразрушающим контролем (ВНК) понимается метод неразрушающего контроля (НК), у которого преобразователь физического поля взаимодействия с контролируемой средой [75] обладает рядом характерных признаков:

- интегрируемость;
- миниатюрность;
- преобразование данных мониторинга в транспортный сигнал для последующей отправки в систему сбора и обработки данных;
- структурная, химическая и механическая совместимость с материалом конструкции.

Методы НК металлических и композитных конструкций имеют свои особенности и ограничения по применимости. Если для металлических материалов применимы классические электропотенциальные, вихретоковые и акустические методы, то для контроля ПКМ применение подобных методов ограничено диэлектрической природой материала, тогда как применение акустических методов возможно в обоих случаях.

Проводя более детальное исследование упомянутых методов НК, следует отметить, что применение электропотенциальных методов сопряжено с некоторой сложностью: во-первых, обязательно наличие электропроводящей среды; во-вторых, возможно возникновение нежелательной ситуации, такой как наличие электростатического заряда во время полета, что может существенно исказить картину контроля и привести к потере корреляции преобразования. Для вихретоковых методов применение высокочастотного метода контроля за трещинообразованием на поверхности контролируемого агрегата также может быть сопряжено с некоторыми трудностями: во-первых, контролируемый агрегат должен быть электропроводящим; во-вторых, необходимо наличие генератора высокой частоты и устройства измерения импеданса катушки, что сложно поддается миниатюризации. Для акустических методов трудности могут возникнуть при регистрации акустического сигнала (будь то акустическая эмиссия или отраженный сигнал от появившегося дефекта) из-за наличия высокого уровня шумов и вибрации во время полета ЛА.

Таким образом, наличие большого числа мешающих факторов существенно ограничивает возможность применения методов классического НК, тогда как применение информкомполитов позволяет решить эту задачу без применения дополнительных технических средств.

Требования к мониторинговым системам для информкомполитов

Неотъемлемой частью при разработке и эксплуатации изделий на основе информкомполитов является система сбора и обработки данных – мониторинговая система (МС), при помощи которой осуществляется сбор, обработка, интерпретация и визуализация данных от сенсорных элементов. Приведем основные требования к МС:

- система должна быть компактной благодаря использованию современных технических решений и элементной базы, удобной в эксплуатации и иметь дружелюбный интерфейс, реализованный

с использованием передовых достижений в области информационных технологий;

– система должна быть одно- либо многоканальной в зависимости от места и условий эксплуатации, что позволит наиболее полно использовать ее потенциал;

– вывод информации от сенсорного элемента должен осуществляться с наименьшими потерями и по минимальному числу каналов;

– соотношение сигнал/шум должно быть не менее 100;

– быстродействие системы должно обеспечивать сбор и обработку данных в режиме реального времени;

– система сбора должна содержать аналого-цифровые преобразователи данных от сенсора для передачи цифрового сигнала устройству обработки (микропроцессору);

– цифровой сигнал должен передаваться устройству обработки по помехозащищенному каналу;

– система должна удовлетворять требованиям по электромагнитной совместимости (ЭМС) и иметь минимальное энергопотребление, что позволит эксплуатировать ее на борту ЛА;

– система должна быть мобильна, иметь минимальные массогабаритные размеры и возможность расширения своих функциональных возможностей; при необходимости использования в жестких климатических условиях – должна быть выполнена во всеклиматическом исполнении;

– устройство обработки может быть реализовано как в составе бортовой ЭВМ, так и выполнено на отдельном микропроцессоре, однако в обоих случаях с обязательной регистрацией параметров на бортовом самописце («черном» ящике) и индикацией на информационном табло пилота при возникновении критических ситуаций;

– программное обеспечение, установленное на МС, должно содержать математические и логические алгоритмы обработки поступающих данных от сенсоров, позволяющие выделять полезный сигнал на фоне шумов источника излучения. Процесс анализа информации можно разделить на две стадии. Для начала нужно установить, надежен ли результат измерения и не противоречит ли он некоторым критериям оценки точности. Вторая стадия состоит в определении величины внешнего воздействия и принятия решения о необходимости реагирования на него.

Тенденции развития ИПКМ с оптоволоконными сенсорами

В ходе анализа научно-технической и патентной документации выявлены следующие тенденции развития ИПКМ с оптоволоконными сенсорами.

– Повышение безопасности эксплуатации сложных технических систем – достигается применением оптоволоконных сенсоров, в том числе в комплексе с актуаторными системами, – для мониторинга состояния объектов авиационной, кос-

мической, строительной, дорожно-мостовой и транспортной инфраструктуры.

– Снижение влияния оптоволоконного материала на его упругопрочностные характеристики – достигается повышением химической, структурной и механической совместимости оптоволоконных световодов с компонентами интеллектуального материала, в том числе путем введения оптического волокна в процессе изготовления 3D-армированного тканого композиционного материала.

– Увеличение надежности оптического сенсорного элемента – достигается введением оптоволоконного сенсорного элемента в процессе изготовления локального датчика деформации или интеграции в конструкцию из ПКМ. Надежность повышается благодаря тому, что сенсор располагается в материале/конструкции, а не закреплен на поверхности.

– Повышение чувствительности встроенного контроля – достигается применением специальных методов укладки оптического волокна при сборке пакета, а также в процессе плетения композиционного материала.

– Увеличение протяженности зоны контроля – достигается применением распределенных оптоволоконных сенсорных систем, работающих на принципах импульсной оптической рефлектометрии.

– Увеличение информативности мониторинга – достигается использованием массивов оптоволоконных сенсоров, расположенных на одном волокне (квазираспределенные сенсоры) или массива волокон, распределенных в объеме конструкции. Применение таких массивов позволяет регистрировать распределение температурных и деформационных полей внутри материала.

– Селекция деформационных и температурных составляющих оптического сигнала – достигается применением специальных топологических схем укладки оптоволоконных сенсоров, позволяющих вычитать температурную составляющую суммарного оптического сигнала (методы термокомпенсации), выделяя полезную деформационную составляющую.

– Повышение качества мониторинга – достигается при использовании технологии оптического мультиплексирования, позволяющей объединять отдельные оптоволоконные сенсорные элементы и массивы в единую сенсорную сеть, тем самым осуществляя непрерывный мониторинг состояния всей конструкции.

Анализ литературных данных по эксплуатации авиационных конструкций из ПКМ показывает, что в настоящее время в мире развернуты широкомасштабные исследования, направленные на разработку и внедрение наукоемкой продукции. Особое внимание уделяется разработке и исследованию ИПКМ с оптоволоконными системами встроенного контроля для мониторинга состояния

в особоответственных высоконагруженных элементах ЛА (крыло, фюзеляж, хвостовое оперение) нового поколения для обеспечения максимальной безопасности полетов, а также мониторингового оборудования – приборно-технических средств для сбора, обработки, интерпретации и визуализации данных.

Особенности технологий изготовления информкомполитов открывают широкие перспекти-

вы при создании конструкций сложной формы путем послойной выкладки всего объема изделия с последующим формообразованием. Применение таких материалов со временем позволит перейти от эксплуатации ЛА по заранее заложенному ресурсу к эксплуатации по фактическому техническому состоянию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 7–17.
2. Гуляев И.Н., Гуняев Г.М., Раскутин А.Е. Полимерные композиционные материалы с функциями адаптации и диагностики состояния //Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 242–253.
3. Шалин Р.Е., Машинская Г.П., Железина Г.Ф. и др. Адаптирующиеся (интеллектуальные) материалы и проблемы их создания /В сб. Технология. Сер. «Конструкции из композиционных материалов». М.: ВИМИ. 1995. Вып. 2. С. 43–48.
4. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. М.: Техносфера. 2006. 224 с.
5. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения //Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
6. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения //Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 19–27.
7. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.
8. Войтович И.Д., Корсунский В.М. Основы информационных технологий. Интеллектуальные сенсоры: Учеб. пособ. М.: Бином. Лаборатория знаний. 2012. 624 с.
9. Гуляев И.Н. Технологические особенности создания – на основе угле- и органоластиков – интеллектуальных информкомполитов с непрерывными тензорезисторными сенсорными элементами: Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: ВИАМ. 2010. 24 с.
10. Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Симонов В.Ф., Урмансов Ф.Ф. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов. М.: Машиностроение. 2000. 352 с.
11. Голубкова Т.А., Короткова В.И., Золкина Т.Г., Гладышева Л.В. Концепция и основные принципы конструирования «интеллектуальных материалов» (обзор) /В сб. Технология. Сер. «Конструкции из композиционных материалов». М.: ВИМИ. 1995. Вып. 2. С. 3–21.
12. Byeong-Wook Jang, Sang-Oh Park, Yeon-Gwan Lee et al. Detection of Impact Damage in Composite Structures using High Speed FBG //Advanced Composite Materials. 2012. V. 21. P. 29–44.
13. Kang H.K., Kang D.H., Hong C.S. et al. Simultaneous monitoring of strain and temperature during and after cure of unsymmetric composite laminate using fibre-optic sensors //Smart Materials and Structures. 2003. №12(1). P. 29–35.
14. Hufenbach W., Kostka P., Holeczek K. et al. In-Situ Integrity Assessment of a Smart Structure Based on the Local Material Damping //Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2013. V. 24. №3. P. 299–309.
15. Kostka P., Holeczek K., Filippatos A., Hufenbach W. Integration of health monitoring system for composite rotors /In: 18-th International Conference on Composite Materials Composite Materials: Key to the Future. Jeju-do: ICC JEJU. 2011. P. 5.
16. Sohn H., Farrar C., Hemez F. et al. A review of structural health monitoring literature: 1996–2001: Report number LA-13976-MS. Los Alamos National Laboratory. 2004. P. 307.
17. 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.
18. 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.
19. Устройство управления аэродинамическим потоком: пат. 101008 Рос. Федерация; опубли. 10.01.2011.
20. Сорокин К.В., Мурашов В.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Прогнозирование развития дефектов в конструкциях из ПКМ способом определения изменений жесткости при актюировании материала //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 20–22.
21. Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В. и др. Особенности создания полимерных композиционных материалов с интегрированной активной электромеханической актюаторной системой на основе пьезоэлектриков //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 31–34.
22. Kablov E.N., Sivakov D.V., Gulyaev I.N. et al. Application of optical fiber as strain gauges in polymer com-

- posite materials //Polymer Science. Series D. 2011. T. 4. №3. P. 246–251.
23. 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.
 24. Федотов М.Ю., Гончаров В.А., Шиенок А.М., Сорокин К.В. Исследование изгибных деформаций углепластика оптоволоконными сенсорами на брэгговских решетках //Вопросы материаловедения. 2013. №2 (74). С. 139–147.
 25. Федотов М.Ю., Сорокин К.В., Гончаров В.А. и др. Возможности сенсорных систем и интеллектуальных ПКМ на их основе //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №2. С. 18–23.
 26. Гончаров В.А., Федотов М.Ю., Шиенок А.М. и др. Моделирование инфузионных технологий изготовления слоистых полимерных композиционных материалов //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №1. С. 43–49.
 27. Гуляев И.Н., Гуняева А.Г., Раскутин А.Е. и др. Молниезащита и встроенный контроль для конструкций из ПКМ //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
 28. Федотов М.Ю., Гончаров В.А., Шиенок А.М. Интеллектуальные ПКМ – материалы нового поколения /В сб. докл. конф. «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России». Научное электронное издание локального распространения. М.: ВИАМ. 2012.
 29. Гончаров В.А., Федотов М.Ю., Шиенок А.М. Моделирование полимерных композиционных материалов /В сб. докл. конф. «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России». Научное электронное издание локального распространения. М.: ВИАМ. 2012.
 30. Волоконно-оптический соединитель: пат. 101209 Рос. Федерация; опубл. 10.01.2011.
 31. Пьезоэлектрический слоистый актюатор: пат. 101271 Рос. Федерация; опубл. 10.01.2011.
 32. Способ измерения деформации конструкции из композиционного материала: пат. 2427795 Рос. Федерация; опубл. 27.08.2011.
 33. Способ определения мест предразрушения конструкций: пат. 2316757 Рос. Федерация; опубл. 10.02.2008.
 34. High density structural health monitoring system and method: pat. 8447530 US; publ. 21.05.2013.
 35. Composite structure having an embedded sensing system: pat. 2013048841 US; publ. 28.02.2013.
 36. Embeddable polarimetric fiber optic sensor and method for monitoring of structures: pat. 7605923 US; publ. 20.10.2009.
 37. Fiber optic system: pat. 6571639 US; publ. 03.06.2003.
 38. Optical fiber sensor system: pat. 6204920 US; publ. 20.03.2001.
 39. Fiber optic sensing systems and methods including contiguous optical cavities: pat. 5698848 US; publ. 16.12.1997.
 40. Composite structure resin cure monitoring apparatus using an optical fiber grating sensor: pat. 5770155 US; publ. 23.06.1998.
 41. Embedded optical sensor capable of strain and temperature measurement using a single diffraction grating: pat. 5399854 US; publ. 21.03.1995.
 42. Fiber optic strain gauge patch: pat. 5649035 US; publ. 15.07.1997.
 43. Sensors and systems for structural health monitoring: pat. 7117742 US; publ. 10.10.2006.
 44. Diagnostic systems of optical fiber coil sensors for structural health monitoring: pat. 7536911 US; publ. 26.05.2009.
 45. Department of defense joint service specification guide. Engines, aircraft, turbine. JSSG-2007A, 29 January 2004.
 46. Department of defense joint service specification guide. Aircraft structures. JSSG-2006, 30 October 1998.
 47. Department of defense handbook. Aircraft structural integrity program. (ASIP). MIL-HDBK-1530B (USAF), NOTICE 1, 20 February 2004.
 48. Composite fibre and related detection system: pat. 8191429 US; publ. 05.06.2012.
 49. Measuring strain on a helicopter rotor blade using multiple sensors: pat. 2464929 GB; publ. 05.05.2010.
 50. Structural monitoring: pat. 2440954 GB; publ. 20.02.2008.
 51. Device for manufacturing e.g. load-bearing component of airplane has fiber Bragg grating sensor integrated into optical fibers to detect characteristic parameter of material flowing through material supply line and/or filling region: pat. 102010035958 DE; publ. 01.03.2012.
 52. Sensor zum Messen von Spannungen in einem Substrat: pat. 102007048817 DE; publ. 16.04.2009.
 53. Composite structure with embedded optical fiber and a process for its repair: pat. 2007063145 WO; publ. 07.06.2007.
 54. Method to monitor structural damage occurrence and progression in monolithic composite structures using fibre Bragg grating sensors: pat. 1677091 EP; publ. 05.07.2006.
 55. Sensor system for measuring deformations in structures or machines has demodulator that converts optical signal into analog or digital to be analyzed by data acquisition system e.g. personal computer (PC): pat. 2267366 ES; publ. 01.03.2007.
 56. Integrated optical instrumentation for the diagnostics of parts by embedded or surface attached optical sensor: pat. 5493390 US; publ. 20.02.1996.
 57. Latini V. et al. Fiber optic sensors system for high temperature monitoring of aerospace structures //SPIE. 2007. V. 6593. P. 65930S.1–65930S.9
 58. Costantini D.M., Michaud V. In-situ simultaneous strain and temperature measurement of adaptive composite materials using a fiber Bragg grating based sensor //SPIE. 2005. V. 5758. P. 62–69.
 59. Damage diagnosis system and damage diagnosis method: pat. 2011191230 JP; publ. 29.09.2011.
 60. Bonded part peeling shape identification device: pat. 7522269 US; publ. 21.04.2009.

-
61. Damage detection system for structural composite material and method of detecting damage to structural composite material: pat. 2005098921 JP; publ. 14.04.2005.
 62. Damage detection system: pat. 2007232371 JP; publ. 13.09.2007.
 63. Modular sensor for damage detection, its manufacturing method, and structural composite material: pat. 2006170767 JP; publ. 29.06.2006.
 64. Method for embedding FBG (Fiber Bragg Grating) sensors into three-dimensional weaving composite material parts: pat. 102564332 CN; publ. 11.07.2012.
 65. System for detecting deformation of optical fiber structure: pat. 20010016729 KR; publ. 05.03.2001.
 66. Monitoring device for rotating body: pat. 2007139262 WO; publ. 06.12.2007.
 67. Composite material reinforcing structure with built-in optical fiber lattice sensor: pat. 20020021706 KR; publ. 22.03.2002.
 68. Fiber Bragg grating sensor: pat. 7702190 US; publ. 20.04.2010.
 69. Optical fiber strain sensor: pat. 7778500 US; publ. 17.08.2010.
 70. Fiber optic force sensor: pat. 7027672 US; publ. 11.04.2006.
 71. Fiber optic force sensor for measuring shear force: pat. 7466879 US; publ. 16.12.2008.
 72. Park S.O. et al. Detection of impact location for composite stiffened panel using FBG sensors //Advanced Materials Research. 2010. V. 123–125. P. 895–898.
 73. <http://www.saristu.eu>.
 74. Бирюк В.И., Голован В.И., Гуняев Г.М., Крючков Е.И. Применение композиционных материалов в концевой части крыла для снижения веса крыла в целом /В сб. Труды ЦАГИ. М.: ЦАГИ. 2002. Вып. 2658. С. 44–49.
 75. Ключев В.В., Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. М.: Машиностроение. 1995. 488 с.
-