

специализированных центров компетенций – национальных лабораторий по полимерным композиционным материалам, металлическим и керамическим конструкционным композиционным материалам, сверхвысокотемпературной теплозащите – на базе Национального исследовательского центра «Материалы и технологии их производства», а также сети взаимосвязанных с ним исследовательских комплексов в ведущих научных организациях, центрах, институтах РАН, национальных исследовательских университетах и на промышленных предприятиях. Очевидно, потребуется также развитие и совершенствование системы междисциплинарной подготовки кадров в ведущих вузах по программам, согласованным с Национальным исследовательским центром как ведущей организацией в области материаловедения, определяющей долгосрочную политику в данном сегменте.

Приведенные стратегические направления развития материалов и технологий являются ключевой составляющей для создания перспективных изделий и формирования необходимого научно-технического задела. Данные стратегические направления соответствуют основным мировым тенденциям развития науки и техники и позволят реализовать задачи, обозначенные в стратегиях развития интегрированных структур и государственных корпораций (ГК «Ростехнологии», ГК «Росатом», ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация», ОАО «Вертолеты России», ФКА «Роскосмос», ОАО «Корпорация “Тактическое ракетное вооружение”», ОАО «Объединенная двигателестроительная корпорация», ОАО «РЖД» и др.).

*И.Н. ГУЛЯЕВ, Г.М. ГУНЯЕВ, А.Е. РАСКУТИН*

### **ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ФУНКЦИЯМИ АДАПТАЦИИ И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ**

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) – стекло-, угле-, органопластики, благодаря своим уникальным свойствам, нашли применение в силовых конструкциях авиакосмической и других видах техники. Объем их применения достиг 50% от массы авиационного планера, обеспечивая ее снижение на 20–25%. ПКМ продолжают совершенствоваться с целью достижения более высоких упругопрочностных характеристик и эксплуатационной надежности.

Одним из таких направлений развития современного материаловедения является концепция создания интеллектуальных («умных») материалов или конструкций, обладающих комплексом функций, помогающих им (материалам) реагировать на окружающие условия и внешние воздействия. Эти материалы или конструкции способны адаптироваться (приспосабливаться) к изменяющимся внешним воздействиям. Разработка интеллектуальных материалов (ИМ) позволит расширить возможности и свойства ПКМ и появляющихся новейших технологий для создания материалов, обладающих контролируемыми, умственными и силовыми способностями. Материалы нового поколения с различной степенью сложности будут использоваться в разнообразных областях науки и техники: нанотехнологии, биоробототехника, нейронные сети, искусственный интеллект, молекулярная электроника и др. Интеллекту-

альные материалы будут способны выбирать и выполнять определенные функции автономно в ответ на изменение параметров окружающей среды или использовать вложенные сенсорные способности при изготовлении изделий, для контроля качества. Самодиагностика, самоадаптация, саморемонт и самоуничтожение – вот некоторые функции, которые будут интегрированы в высокоструктурированных ИМ.

Современные разработки ИМ проводятся при кооперации исследовательских организаций и промышленных фирм, работающих в различных областях знаний, и в ряде случаев не только в рамках отдельных стран. В странах, занимающихся разработкой ИМ, существует множество взглядов на проблемы создания и возможности дальнейшего их развития. Несмотря на различие взглядов, «интеллектуальность» или «разумность» материала трактуется как способность ИМ самопроизвольно, «инстинктивно» отвечать на незапрограммированные ситуации, т.е. способность адаптироваться к нештатным ситуациям с целью сохранения работоспособности.

Среди множества требований, которые предъявляются к ИМ, можно выделить адекватное взаимодействие с внешней средой, позволяющее сохранить эксплуатационные свойства; способность не только противодействовать воздействиям среды, но и исправлять повреждения, вызванные внешними и внутренними воздействиями, а также обладать широким спектром других возможностей для применения их в той или иной ситуации.

Реализация функций материала может основываться на возможностях самого материала или структурных элементов, входящих в его состав, например, элементы могут быть:

- оптическими, т.е. обеспечивать изменение цвета или светоиспускания;
- электрическими – получение электрического сигнала, электроэнергии, проводимости и т.д.;
- магнитными – приводящими к намагничиванию, поляризации и т.п.;
- динамическими – создание заданного напряженного состояния;
- термическими – генерация теплоты;
- химическими – окисление, восстановление и т.п.

Эти функциональные возможности связаны с изменениями, происходящими в веществе на различных уровнях его структуры: молекулярном и кристаллическом, в поверхностных и межфазных слоях, на границе зерен, путем перемещения ионов, радикалов и т.д., переносом и сохранением заряда, адсорбцией, массопереносом, высвобождением энергии или изменениями физических констант и многими другими изменениями.

В ВИАМ развиваются направления по разработке конструкционных ПКМ интеллектуального типа – «адаптирующихся» и «информационных».

Адаптация – способность материала приспособливаться и адекватно реагировать на внешние или внутренние воздействия; может обеспечиваться путем создания неравновесного состояния структуры ПКМ (самоадаптирующийся материал) или введения в структуру материала исполнительных элементов (актюаторов), управляемых встроенной или внешней логической системой.

Самоадаптирующийся ПКМ состоит из чередующихся слоев или блоков слоев, имеющих несбалансированную структуру относительно выбранных осей анизотропии, которая при внешнем воздействии создает

отличающийся от нуля суммарный вектор или суммарный момент относительно этих осей, что вызывает пространственную деформацию материала. В результате неуравновешенности суммы сил и моментов относительно выбранных осей в материале появляются касательные напряжения кручения, вследствие возникающего крутящего момента, материал (изделие, выполненное из него) деформируется, изгибаясь в плоскости. В случае нагружения материала напряжениями изгиба происходит два вида деформаций, изменяющих форму, – прогиб и кручение.

Величины этих деформаций взаимосвязаны и зависят от многих факторов, но, в первую очередь, от жесткости материала и изделия из него, т.е. от модуля упругости материала в направлении укладки слоев, толщины и геометрической формы изделия. Изменение формы изделия и ее возврат в первоначальное положение происходит автоматически, без вмешательства человека в результате возрастания или уменьшения поля напряжений, действующих в материале конструкции.

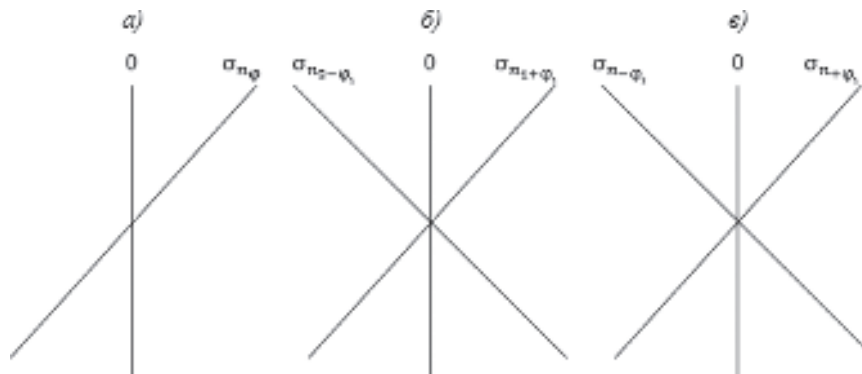


Рис. 1. Анизотропия структуры слоистого композиционного материала за счет укладки слоев

Несбалансированность структуры в слоистом композиционном материале достигается несколькими путями:

– укладка всех слоев или их части под углами  $\varphi$  несимметрично относительно выбранных осей анизотропии (рис. 1), причем  $0 < \varphi < 90$  град, при этом

$$\sum_{i=n}^{i=0} \sigma_{\varphi_1} + \dots + \sigma_{\varphi_1} + \dots + \sigma_{\varphi_n} \neq 0;$$

– укладка слоев под одинаковыми углами  $\varphi$  симметрично или несимметрично относительно выбранных осей анизотропии, но находящимися на различных расстояниях от плоскости, проходящей через середину толщин материала (рис. 2, а), при этом

$$\sum \sigma_{\varphi_1} h_1 + \dots + \sigma_{\varphi_2} h_2 + \dots + \sigma_{\varphi_n} h_n \neq 0, \dots, h_{1\varphi_+} \neq h_{2\varphi_+};$$

– использование в конструкционном материале разномодульных слоев, выполненных из однородных (например, углепластиков из волокон с различным модулем упругости) или разнородных (углепластиков

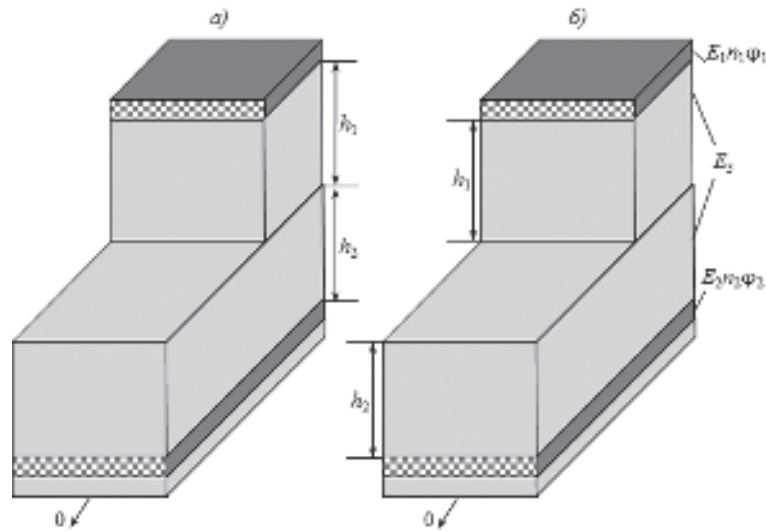


Рис. 2. Анизотропия структуры слоистого композиционного материала за счет различных расстояний от плоскости симметрии (а) и использования разномодульных слоев (б)

и стеклопластиков) слоев разномодульных композиционных материалов (рис. 2, б), при этом  $E_{\phi-} \neq E_{\phi+}$ .

Наиболее значимым является достижение несбалансированной структуры путем несимметричной укладки волокон относительно главной оси анизотропии (0 град). В этом случае основными факторами, влияющими на адаптивные характеристики композиционного материала, являются углы ориентации пакетов (слоев) волокон и их процентное содержание. Диапазон рациональных укладок в зависимости от типа конструкции составляет 15–25 град, в этом случае достигается максимальная связь между круткой и прогибом. При этом процентное содержание волокон, уложенных под этими углами, должно составлять ~60% относительно слоев, уложенных в направлении 0 град (рис. 3). Общая схема укладки волокон в структуре адаптирующегося материала должна рассчитываться конструктором в зависимости от нагрузок, действующих на изделие (рис. 4) [1].

В углепластиках самоадаптация может происходить наиболее эффективно, поскольку при малых деформациях в них возникают высокие напряжения, которые и приводят к адаптации. Самоадаптирующийся материал может быть изготовлен на основе различных связующих (ВС-2526к, ЭНФБ-2М, ЭДТ-69 и др.) и углеродных жгуто-

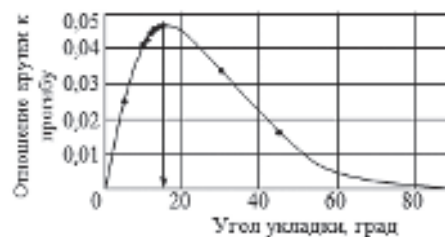


Рис. 3. Зависимость отношения крутки к прогибу от угла укладки слоев (60 : 40) в композиционном материале кессона

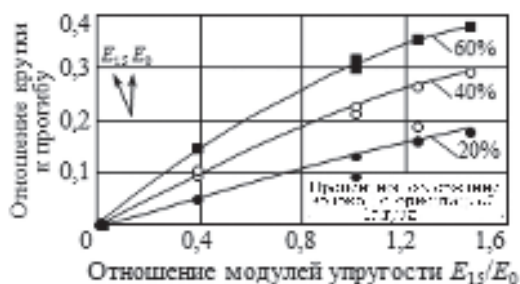


Рис. 4. Обобщенные зависимости деформаций от процентного содержания волокон в композиционном материале (экспериментальные данные: 20 (●); 40 (○) и 60% (■))

Перспективными материалами с точки зрения придания функций адаптации могут стать металлополимерные композиционные материалы (МПКМ), в том числе алюминий-углепластик «АЛКАР», титаноуглепластик «ТИГР», а также МПКМ на основе борных, кремнийорганических SiC или оксидов металлов  $Al_2O_3$  волоконных армирующих наполнителей. В этом случае несбалансированность укладки осуществляется также за счет разориентации слоев углепластика в МПКМ относительно оси нагружения.

вых наполнителей (УОЛ-300-3А, УТ-900-3А, ЭЛУР-01П) и их комбинаций в соответствии с требованиями по упруго-прочностным и адаптивным характеристикам конструкции.

К настоящему моменту разработан ряд ПКМ (углепластиков), обладающих функциями самоадаптации, это материалы АКМ-1, АКМ-2, КМУ-4т-2М на основе отечественных углеродных наполнителей и КМУ-4-2М-3673 на основе однонаправленного углеродного наполнителя фирмы «Porcher Ind.».

Таблица 1

Адаптационные характеристики металлополимерного композиционного материала «алюминий-углепластик» (Ме-УП)

Схема укладки	Прогиб, мм		Угол крутки $\alpha$ , град
	$f_1$	$f_2$	
Ме + УП (4 слоя [15 град]) + Ме	30	40	11,2
Ме + УП (2 слоя [15 град] + [0 град] + 2 слоя [15 град]) + Ме	33	44,5	12,8
Ме + УП (2 слоя [15 град] + [90 град] + 2 слоя [15 град]) + Ме	33	44	12,3
Ме + УП (6 слоев [15 град]) + Ме	32,5	43,5	12,2

Сочетание слоев алюминиевого сплава и углепластика позволяет получить слоистый металлополимерный композит с широким диапазоном упруго-прочностных свойств. В зависимости от состава и структуры (объемного соотношения металла и углепластика) его прочность при растяжении изменяется от 290 до 900 МПа, модуль упругости – от 50 до 93 ГПа, прочность при сжатии – от 430 до 725 МПа. Исследования адаптационных возможностей слоистого металлополимерного композита «алюминий-углепластик», где в качестве базового угла ориентации волокон, влияющего на деформационные характеристики, был выбран угол, равный 15 град, и варьировалось процентное содержание монослоев с углом укладки 15 град, показали, что в среднем характеристики адаптации составили: прогиб

в центре образца  $W_0 = 36,1$  мм; угол крутки  $\alpha = 11,2$  град; относительная крутка  $\alpha/W_0 = 0,31$ . В табл. 1 приведены результаты исследований адаптирующегося углепластика с различными типами структуры.

Эффект самоадаптации разрабатывался в единственном экземпляре для крыла обратной стреловидности истребителя Су-47 «Беркут» (ОАО «ОКБ Сухого»). Адаптация конструкции обеспечивает стабильность углов атаки и, как следствие, высокие аэродинамические характеристики при полетах с большими углами атаки и высокую маневренность самолета. Кроме того, во ФГУП ЦАГИ по контракту с фирмой «Airbus», проводились расчеты крыла с адаптирующейся законцовкой, а также конструкция крыла с адаптирующейся законцовкой прорабатывается для конструкции самолета МС-21.

Проведено моделирование кессона крыла, которое позволило проверить переход напряжений изгиба в напряжения крутки и зафиксировать изменения геометрии крыла, его крутки и прогибы. По результатам экспериментальных данных был проведен сравнительный анализ обычного крыла и крыла предлагаемой конструкции. Рассмотрен случай нагружения крыла при маневренных нагрузках согласно требованиям АП-25 и выбран наиболее тяжелый случай нагружения с максимальным силовым набором 138 МПа при эксплуатационной нагрузке 2,5 при высоте полета 10000 м и скорости 0,88 Ма для самолета с полетной массой 585 т. Полученное снижение массы при длине концевой части, составляющей 0,31 относительно размаха консоли крыла (при общем размахе крыла 90 м), обеспечило в 1,5 раза изменение угла атаки поточных сечений крыла и снижение подъемной силы, как следствие – снижение на 4% изгибающего момента в корневой части крыла. Это обеспечивает снижение его массы на 3500 кг по сравнению с аналогичным крылом, выполненным из алюминиевых сплавов. Результаты этих испытаний показали, что все теоретические выкладки и результаты экспериментальных испытаний применимы для проектирования крыла. Это позволяет надеяться на успешную реализацию этого способа изменения геометрии крыла и аэродинамики всего самолета.

Новым подходом к адаптации материалов или элементов конструкций, выполненных из них, является применение внедренных в структуру композита электромеханических элементов на основе пьезокерамических актюаторов.

Пьезоэлектрические электромеханические актюаторы, выполненные в виде цельных элементов или многослойных наборных элементов, а также групп многослойных элементов, объединенных в одну систему, являются одними из наиболее интересных с практической точки зрения. Эти системы предназначены для изменения деформационно-напряженного состояния конструкций из ПКМ, а при расположении актюаторов в приповерхностной области композиционного материала возможно изменение геометрического профиля поверхности. Например, при изготовлении обшивки летательного аппарата возможно создать группу отклоняемых элементов на поверхности обшивки, приводимых в действие при прохождении электрического тока.

Наиболее распространенными типами актюаторов являются актюаторы изгибного типа и актюаторы линейного перемещения. Изгибные актюаторы имеют широкую номенклатуру по планарным размерам (от 1 до 100 мм), обеспечивают перемещение от нескольких единиц до несколь-

ких сотен мкм. Актюаторы линейного перемещения представляют собой, как правило, многослойные пьезокерамические элементы [2].

Интеллектуальные материалы и конструкции на основе пьезоэлектрических сенсоров/актюаторов позволяют решить проблемы снижения вибраций вертолетов (фюзеляжа, лопастей), шума, улучшения их летных характеристик. Применение пьезокерамических и пьезополимерных материалов в конструкции лопасти вертолета позволит контролировать нагрузки и вибрации лопасти путем изменения формы профиля под действием активной системы управления.

Еще одним направлением в области создания конструкционных ПКМ интеллектуального типа, разрабатываемыми в ВИАМ, стали информкомпози́ты – материалы, обладающие способностью контролировать напряженно-деформационное состояние с помощью входящих в состав непрерывных тензорезисторных сенсорных элементов на основе структурных элементов ПКМ или интегрированных локальных тензоров на основе оптических волокон, пьезоэлектриков или электрических датчиков. Такие материалы могут применяться в наиболее ответственных конструкциях или в труднодоступных участках для непрерывного мониторинга и диагностики напряженного состояния, что может обеспечить переход от эксплуатации авиационной техники по ресурсу к эксплуатации по состоянию.

Создание информкомпози́тов невозможно без создания сенсорных элементов, отвечающих ряду требований: полная структурная и механическая совместимость с базовым материалом, стабильность параметров в условиях эксплуатации изделия (при действии механических нагрузок, вибраций, в условиях повышенной влажности и температуры), подготовленность современных технических средств для съема и обработки информации применительно к определенному типу сенсоров.

В качестве сенсоров для информкомпози́тов на основе ПКМ могут быть использованы чувствительные элементы, работающие по различным физическим принципам, – токопроводящие элементы, оптические световоды, пьезоэлектрики, имеющие как функциональные, так и структурно-химические особенности. В качестве токопроводящих сенсорных элементов могут быть рассмотрены металлические микропровода, токопроводящие волокна, металлизированные компоненты, для которых достаточно хорошо разработаны способы регистрации и обработки информации. Использование волоконистых световодов для передачи информации на различные расстояния известно давно, однако в составе конструкционных ПКМ авиакосмического назначения они не применялись. В этом случае волоконные световоды могут быть рассмотрены не только как системы для передачи информации, но и как встроенный сенсорный элемент, реагирующий на внешнее механическое поле и изменяющий передаваемый оптический сигнал соответственно механической нагрузке. Особенностью сенсоров на основе пьезоэлектриков по сравнению с другими элементами является возможность использования как прямого, так и обратного пьезоэффекта, т.е. сенсорный элемент может быть использован и как исполнительный элемент для адаптирующихся систем.

Для снижения локального влияния при введении в материал сенсорных элементов могут быть использованы структурные элементы самого материала. Это позволит получить оптимальную структуру без ухудше-

ния физико-механических характеристик и внесения дополнительных, инородных по своей природе элементов.

Разработка подобных материалов во многом стала возможной благодаря широкому распространению композиционных материалов на основе волоконных армированных пластиков, используемых в том числе для изготовления ответственных и высоконагруженных конструкций и элементов планера самолета. Использование армирующих наполнителей (волокон, нитей), входящих в состав композиционного материала, в качестве сенсорного элемента (датчика) позволяет реализовать данную идею на практике. Разработка информкомпозитов с непрерывными (протяженностью, соответствующей размеру детали или контролируемого участка) тензочувствительными сенсорными элементами на основе армирующих волокон позволит получать интегральное (распределенное) значение нагрузок по всей длине, уменьшит количество сенсоров и улучшит контроль в процессе эксплуатации [3].

Информкомпозиты могут быть созданы при использовании любого типа волоконного полимерного композиционного материала – угле-, стекло-, боро- и органопластиков. При этом в ряде случаев (например, для придания электропроводящих свойств или создания диэлектрической оболочки) может применяться модифицированный волоконный армирующий элемент. В данной статье рассмотрены два вида сенсорных элементов для введения в соответствующие композиты: на основе углеродных волокон, обладающих собственными электропроводящими свойствами, и органических волокон – ярко выраженных диэлектриков, обладающих высокими деформационными характеристиками.

Углеродное волокно обладает собственной проводимостью, поэтому для получения информации от сенсорного элемента необходимо электроизолировать тензорезисторный элемент от основных армирующих волокон углепластика. В качестве тензорезисторного элемента могут быть использованы высокомодульные углеродные жгуты и нити, выделенные из состава волоконного наполнителя (лент). Углеродные волокна получают из прекурсора ПАН-волокон путем термоокисления, карбонизации и графитации. Высокомодульные волокна, которым свойственна повышенная температура термообработки, обладают большей электропроводностью и термостабильностью. Основой углеродных наполнителей, таких как ЛУ-24, Кулон, является трощеная нить (в два сложения), состоящая из 280 моноволокон, а углеродных наполнителей ЛЖУ, Гранит, УОЛ и т.д. – жгут-ровница, состоящий из 3000 моноволокон (рис. 5).

При создании сенсорных элементов на основе углеродных волокон и введении их в композиционный углепластик принимали во внимание, что углеродное волокно обладает собственной проводимостью, поэтому для получения информации от сенсорного элемента необходимо электроизолировать тензорезисторный элемент от основных армирующих волокон углепластика. В работе при изготовлении сенсорных элементов в качестве электроизоляционного слоя (диэлектрической подложки) использовали стеклоткани электроизоляционного назначения. Проведенные исследования показали, что для обеспечения электроизоляции сенсорного элемента требуется от 4 до 6 слоев ткани, что существенно влияет на структуру и свойства углепластика. Оптимальная среди исследованных – ткань Э1-30П, обладающая наименьшей толщиной ( $0,030 \pm 0,002$  мм)



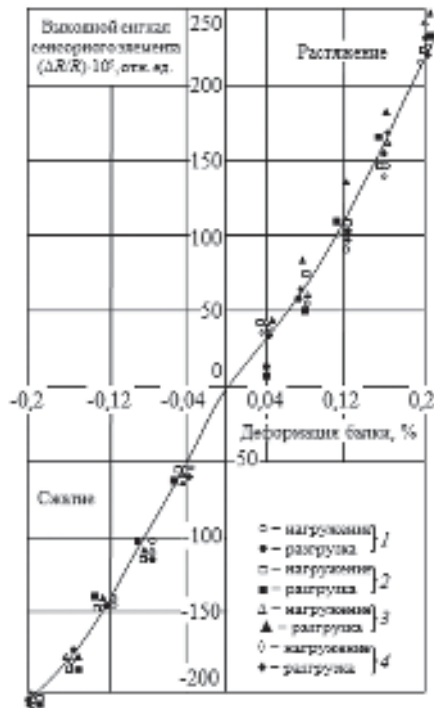


Рис. 5. Зависимость коэффициента тензочувствительности от деформации сенсорного элемента на основе углеводного жгута Гранит-40П

и наибольшей поверхностной плотностью ( $27 \pm 3 \text{ г/м}^2$ ), что позволяет уменьшить количество ее слоев.

Органические (арамидные) волокна СВМ и Армос – полимерные волокна на основе структурированного ароматического полиамида – обладают плотностью  $1430 \text{ кг/м}^3$ , высокой прочностью при растяжении:  $3000\text{--}4500 \text{ МПа}$ , модулем упругости при растяжении до  $150 \text{ ГПа}$ , удлинением при разрыве до  $3,5\text{--}4,0\%$ , а также высоким удельным электрическим сопротивлением ( $10^{13} \div 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), поэтому для создания сенсорного элемента требуется модификация арамидного волокна путем нанесения на него электропроводящего покрытия. Благодаря своей структуре, арамидное волокно имеет большую удельную поверхность, позволяющую провести поверхностную модификацию волокна.

Для получения сенсорных элементов на основе нитей из арамидных волокон использовали способ вакуумного напыления никеля на их поверхность. Металлизацию никелем образцов нитей СВМ и Армос

проводили на вакуумной установке ВУ-1. Установка обеспечивает предварительную откачку рабочего объема до давления  $0,005 \text{ Па}$ , оснащена системой газонапуска с обратной связью по общему давлению, планарными магнетронами с размером катода-мишени  $500 \times 100 \text{ мм}$  и ускорителем ионов с анодным слоем (протяженность ионного пучка  $500 \text{ мм}$ , ионный ток до  $0,4 \text{ А}$ , средняя энергия ионов  $300\text{--}1000 \text{ эВ}$ ) для подготовки поверхности нити. Ускоритель ионов и магнетроны расположены вертикально на боковой стенке вакуумной камеры. Устройство перемещения подложек с нитями выполнено в виде барабана с вертикальной осью вращения. Скорость вращения барабана с подложками регулируется от 2 до  $20 \text{ об/мин}$ .

Покрывают наносили на арамидные волокна с различной линейной плотностью ( $14,3$ ;  $29$ ;  $58,8$  и  $100 \text{ текс}$ ), закрепленные на технологической оснастке и высушенные до постоянной массы при температуре  $120^\circ\text{C}$ . Электросопротивление нанесенного покрытия контролировали после каждого цикла. Толщина покрытия и его электросопротивление (табл. 2) не зависят от типа арамидного волокна, а зависят лишь от продолжительности напыления.

Анализ результатов исследования зависимости электросопротивления сенсорного элемента от нагрузки показывает, что тензорезисторные датчики на основе арамидных нитей с никелевым покрытием обладают до-

статочной высокой информативностью, прочностью, механической и технологической совместимостью с основными компонентами металлокомпозиции и удобны для снятия информации.

Применение разработанных сенсорных элементов при изготовлении органоэластика не требует корректировки или изменения режимов формования [3, 4].

Проведенные исследования сенсорных элементов (как углеродных – для углепластика, так и на основе металлизированных арамидных волокон – для органоэластика) показывают эффективность их применения в элементах высоконагруженных деталей, особенно в труднодоступных для прямого контроля местах.

Таблица 2

Электросопротивление сенсорных элементов на основе нити Армос

Тип волокна (линейная плотность нити), производитель	Электросопротивление при продолжительности напыления, кОм		Прочность при растяжении, МПа	
	14 мин	40 мин	исходная	после напыления (независимо от времени)
Армос (29,4 текс)	5,1–11,9	2,0–2,7	3740	3870
Армос (58,8 текс)				
с круткой производства: г. Тверь	7,3–20,2	2,4–5,7	3600	3600
ВНИИПВ	8,5–13,4	2,5–5,9	3550	3550
Армос (58,8 текс) без крутки, ВНИИПВ	1,5–6,3	1,5–2,0	3810	3810
Армос (100 текс)	1,7–6,7	0,4–0,9	4090	4090

Большим потенциалом для осуществления непрерывного мониторинга элементов конструкций из ПКМ обладают также сенсорные элементы на основе волоконно-оптических брегговских решеток.

Совместно с НЦВО РАН проведено исследование возможности использования в углепластике сенсорных элементов на основе волоконно-оптических брегговских решеток. Опробованы образцы волоконных световодов с различными защитными покрытиями – полимерными и металлическими, и установлено, что волоконные световоды имеют устойчивость к воздействию технологических факторов: повышенной температуре, давлению, контакту с агрессивными компонентами связующего, поэтому процесс формования углепластиков не приводит к возникновению оптических потерь в волоконных световодах. Установлено, что они могут быть введены в состав композита на стадии его получения, поскольку имеют устойчивость к воздействию технологических факторов: повышенной температуре, давлению, контакту с жидкими и агрессивными компонентами связующего, и процесс формования КМ не приводит к возникновению оптических потерь. Используемые защитные покрытия обладают достаточно высокой адгезией к связующему ЭНФБ-2М. Исследованы об-

разцы КМ с введенными сенсорными элементами, измерены чувствительность и линейность откликов, проведена оценка диапазона измерений. В процессе формования КМ в углепластике возникают внутренние напряжения, что приводит к деформации сжатия и спектральному смещению брегговской решетки на величину  $\sim 0,4$  нм.

Mid4023946 исследованы также характеристики *одномодовых* волоконных световодов при отработке технологии введения сенсорных элементов на волоконных брегговских решетках в композиционный материал. Исследованы зависимости изменения длины волны брегговской решетки от величины приложенной к световоду деформации.

Проведены исследования изменения спектральных характеристик брегговских решеток после их введения в углепластик. Показано, что длина волны не изменилась, коэффициент отражения уменьшился не более чем на 10%. В результате проведенных исследований установлено, что технологические факторы изготовления углепластика (температура и давление) не оказывают существенного влияния на эксплуатационные характеристики сенсорного элемента.

Исследованы возможности учета температурного воздействия на отклик сенсора с волоконно-оптической брегговской решеткой, введенного в композиционный материал. Компенсация температурного влияния при измерении деформации углепластика возможна путем использования двух однородных сенсоров с волоконными брегговскими решетками с различными резонансными длинами волн, расположенных непосредственно в структуре композиционного материала или на его поверхности. По результатам исследований наиболее информативным и эффективным по возможности температурной компенсации при измерении напряженно-деформационного состояния является дифференциальная схема расположения сенсорных элементов в структуре композиционного материала.

Исследованы влияния климатического воздействия при температуре  $170^{\circ}\text{C}$  в течение 2000 ч и термовлажностного старения на оптические характеристики сенсорных элементов на основе волоконно-оптических брегговских решеток, введенных в композиционный материал. По результатам исследований определены поправочные коэффициенты температурной чувствительности сенсорного элемента деформации с волоконными брегговскими решетками (резонансные длины волн и коэффициент отражения после отжига) при различных температурных воздействиях. В результате теплового и тепловлажностного старения было показано, что все сенсоры на основе кварцевого стекла, введенные в углепластик, сохранили высокое пропускание без уменьшения их оптической прозрачности.

Одной из распространенных причин повреждения конструкций из углепластиков является ударное воздействие, которое приводит к значительному повреждению композиционных материалов. Энергия удара обычно поглощается за счет многослойного разрушения композитов вследствие их низкой пластической деформативности, что приводит к снижению упруго-прочностных характеристик конструкции.

Исследована возможность контроля ударных повреждений интегрированными сенсорными элементами на основе волоконно-оптических брегговских решеток. Показано, что зона чувствительности сенсорного элемента на основе волоконной брегговской решетки, интегрированного в углепластик, от удаленности ударного воздействия в момент удара вдоль оси  $x$  составила 100 мм при энергии удара 4 Дж/мм. При увели-

чении энергии удара зона чувствительности увеличивается. При этом регистрация ударного повреждения после ударного воздействия возможна лишь при условии, что волоконная брегговская решетка попадает в зону удара или в зоны расслоений, вызванных ударным воздействием.

Помимо авиационных конструкций интеллектуальные материалы могут быть с успехом применены в строительстве высотных сооружений, мостостроении, особенно в вантовых мостах. В этом случае силовые элементы моста или дополнительные накладки из адаптирующегося материала с требуемой ориентацией не только усиливают конструкцию, но и придают ей нужные демпфирующие свойства. Адаптирующиеся материалы могут быть внедрены при разработке широкоходных лопаток компрессоров газо- и нефтеперекачивающих станций, вентиляторов и винтов ветроэнергетических установок, в которых размеры лопастей достигают нескольких метров (3–10 м) и толщина обшивок в комлевой части: 15–30 мм. Они могут применяться в медицине при создании корсетов для исправления осанки. Такой заплечный корсет при сутулости, благодаря взаимосвязи деформации изгиба и кручения углепластиковых элементов корсета, будет вызывать необходимый умеренный болевой эффект.

Интеллектуальные материалы призваны определить технологии и материаловедение XXI века.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюк В.И., Голован В.И., Гуляев Г.М., Крючков Е.И. Применение композиционных материалов в концевой части крыла для снижения веса крыла в целом // В сб.: Прочность, колебания, ресурс авиационных конструкций и сооружений: Труды ЦАГИ. М.: ЦАГИ. 2002. Вып. 2658. С. 44–49.
2. Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Особенности создания полимерных композиционных материалов с интегрированной активной электромеханической актюаторной системой на основе пьезоэлектриков // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 1. С. 31–34.
3. Гуляев Г.М., Машинская Г.П., Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А., Шалин Р.Е. Сенсоры для интеллектуальных и самоадаптирующихся композитов // В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. Полимерные композиционные материалы. М.: ВИАМ. 2002. С. 45–49.
4. Гуляев И.Н., Железина Г.Ф. Металлоорганопластики для стопперов-индикаторов повреждений обшивок // В сб.: Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2002. Вып. 3. С. 37–43.

*И.Ф. ДАВЫДОВА, Н.С. КАВУН*

## СТЕКЛОПЛАСТИКИ – МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Стеклопластики – первые высокопрочные композиционные материалы, широко используемые в различных отраслях техники и в быту. Объем потребления стеклопластиков различного назначения непрерывно увеличивается, несмотря на все возрастающее применение новых композиционных материалов на основе углеродных, органических и других волокон. Такое применение стеклопластиков прежде всего связано с универсаль-