

- построение зависимости изменения значений для каждой из резонансных частот от толщины ГНС тестовых образцов;
- для полученных приведенных зависимостей, определение такой разности, результатом которой будет монотонная зависимость изменения данной разности от толщины ГНС тестовых образцов (см. рис. 12);
- исследование образца из такого же титанового сплава с неизвестным значением толщины ГНС, определение значения резонансных пиков и соотнесение их с полученной монотонной зависимостью.

В итоге можно сделать ряд выводов:

- предложен способ неразрушающего контроля толщины газонасыщенного слоя методом электромагнитной структуроскопии;
- представлена математическая модель титанового сплава с газонасыщенным и оксидным слоем;
- экспериментально доказано существование корреляционной зависимости на ряде резонансных частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов С.П., Брун М.Я. Титановые сплавы. Металловедение титана и его сплавов.– М.: Металлургия. 1992. 352 с.
2. Чечулин Б.Б., Разуваева В.Н. Титановые сплавы в машиностроении.– Л.: Машиностроение. 1977. 248 с.
3. Ключев В.В., Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник.– М.: Машиностроение. 1995. 488 с.
4. Тихонов А.Н. К математическому обоснованию теории электромагнитных зондирований //Вычислительная математика и математическая физика. 1965. Т. 5. №3. С. 545–547.
5. Солонина А.И., Улахович Д.А. Основы цифровой обработки сигналов: Учеб. пособие.– СПб.: БХВ-Петербург. 2003. 453 с.
6. Ярмольчук Г.Г. Бесконтактный метод определения удельного электрического сопротивления //Автоматика и телемеханика. 1958. № 3. 65 с.

УДК 678.7

И.Н. Гуляев, Г.М. Гуняев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ АРМИРУЮЩИХ ВОЛОКОН В КАЧЕСТВЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Показаны пути разработки и использования непрерывных (протяженностью, соответствующей размеру детали или контролируемого участка) тензочувствительных сенсорных элементов на основе армирующих углеродных и металлизированных арамидных волокон, позволяющих связать уровень деформаций с уровнем напряжений, возникающих в ответственных деталях или в труднодоступных участках конструкции из композиционного материала.

Ключевые слова: интеллектуальные материалы, углепластики, органопластики, сенсорные элементы, тензорезисторы.

Для различного рода исследований и оценки упруго-прочностных характеристик в материале и/или конструкции применяют традиционные дискретные тензорезисторные

датчики, прикрепляемые на поверхность испытываемого материала или конструкции. Традиционные тензодатчики имеют небольшие размеры и выполнены из сплавов типа константан, никром и др., обладающих высокими характеристиками удельного электросопротивления и коэффициента тензочувствительности. Тензочувствительность – способность сенсора реагировать изменением своего электрического сопротивления на изменение напряженно-деформированного состояния – является основой функционирования тензорезисторных сенсоров. Они позволяют с высокой точностью определять деформации, возникающие при нагружении. При этом основными недостатками подобных систем контроля остается именно их метод соединения с материалом и/или конструкцией, поскольку клеевое или механическое сопряжение может искажать деформации, – приводить к получению или более высоких (повышенная прочность) или более жестких (повышенный модуль) деформационных характеристик. Кроме того, применение подобных систем из сотен дискретных датчиков затрудняет их применение в процессе эксплуатации конструкции при воздействии различных температурных, акустических, вибрационных и др. факторов.

Одним из путей устранения перечисленных недостатков является введение тензорезисторных датчиков в структуру материала, что позволит избежать проблем с креплением и правильностью передачи деформаций на тензодатчик, однако может вызвать множественную неоднородность, послужить концентраторами напряжений в структуре материала и повысить вероятность разрушения на границе раздела поверхностей материала и сенсорного элемента.

Для снижения локального влияния при введении в материал сенсорных элементов, в их качестве могут быть использованы структурные элементы самого материала. Это позволит получить оптимальную структуру без ухудшения физико-механических характеристик и внесения дополнительных, инородных по своей природе элементов.

В настоящее время 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 «ощущать» (контролировать) себя и адаптироваться (приспосабливаться) к изменяющимся внешним воздействиям. Материалы, обладающие способностью контролировать свое напряженно-деформационное состояние с помощью введенных в их состав сенсорных элементов, получили название информкомполитов. Такие материалы могут применяться и устанавливаться в наиболее ответственных конструкциях или в труднодоступных их участках.

Создание информкомполитов 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.

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 информкомполитов 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 [1].

Информкомполиты 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 ди-

электрической 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.

Углеродные волокна обладают рядом уникальных свойств, делающих их незаменимыми при создании современных и перспективных материалов для авиационной техники. Углепластики по сравнению с металлическими материалами имеют существенное преимущество по удельным значениям прочности (>36 км (усл. ед.)) и жесткости (>5800 км (усл. ед.)) – прочность и модуль упругости, отнесенные к плотности, – демпфирующей способности ($\delta > 3,0\%$), динамической выносливости ($\sigma_{-1} > 300$ МПа). Они обладают исключительной радиационной, коррозионной, химической и микологической стойкостью, высокой стабильностью размеров при нагревании и охлаждении, а также возможностью регулирования практически всех свойств материала, которое можно осуществлять путем подбора составляющих компонентов, их количественного соотношения, распределения и ориентации в объеме материала, что позволяет получать конструкционные углепластики многофункционального назначения [2]. 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 высококомодульные углеродные жгуты и нити, выделенные из состава волоконного наполнителя (лент). Углеродные волокна получают из прекурсора ПАН-волокон путем термоокисления, карбонизации и графитации. Температура конечной обработки углеродного волокна влияет на его упруго-прочностные характеристики: так, ленты ЭЛУР-П и ЛУ-П подвергают термообработке при конечной температуре $1500\text{--}1700^\circ\text{C}$, ленты типа Кулон, ЛЖУ (высокомодульные) – при $2000\text{--}2200^\circ\text{C}$. Высокомодульные волокна, которым свойственна повышенная температура термообработки, обладают большей электропроводностью и термостабильностью. Основой углеродных наполнителей, таких как ЛУ-24, Кулон, является трощеная нить (попарно скрученное моноволокно) в 280 моноволокон, а углеродных наполнителей ЛЖУ, Гранит, УОЛ, и т. д. – жгут-ровница, состоящий из 3000 моноволокон.

В ходе исследований были определены требования, предъявляемые к сенсорным элементам, встраиваемым в структуру углепластика, и выбраны углеродные волокна, отвечающие этим требованиям: с высоким коэффициентом тензочувствительности (K), равными значениями коэффициента при растяжении и сжатии, линейностью сигнала. Среди исследованных сенсорных элементов лучшими коэффициентами тензочувствительности обладают углеродные жгуты из лент ЛЖУ-35ВМ и Гранит 40П. Исследование показало, что эти волокна обладают следующими характеристиками:

- линейной диаграммой деформирования при нагружении вплоть до $0,9 \sigma_b$;
- высоким удельным электрическим сопротивлением, обеспечивающим возможность создания сенсорного элемента с номинальным электрическим сопротивлением не менее $50\text{--}100$ Ом на базе измерения $150\text{--}200$ мм;
- высоким коэффициентом тензочувствительности при растяжении/сжатии ($1/0,95$);
- малой ползучестью в диапазоне температур $20\text{--}150^\circ\text{C}$ – не более $1\text{--}2\%$ в течение 1 ч при деформации $2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.;
- низкими температурными коэффициентами линейного расширения ($[0,5 \div 1] \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и электрического сопротивления при растяжении и сжатии.

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 стек-

лоткани 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. Оптимальной, среди исследованных, являлась ткань Э1-30П, обладающая наименьшей толщиной ($0,030 \pm 0,002$ мм) и наибольшей поверхностной плотностью (27 ± 3 г/м²), позволяющей уменьшить количество ее слоев.

При отработке технологии изготовления тензорезисторных элементов углеродные жгуты из лент ЛЖУ-35ВМ и Гранит 40П помещали между слоями препрега из стеклоткани Э1-30П и проводили предотверждение пакета. Проводящий элемент имел трех- или четырехкратную зигзагообразную укладку по длине образца. К концам проводящего элемента припрессовывали металлическую сетку.

Получаемый непрерывный (протяженностью, соответствующей размеру детали или контролируемого участка) тензорезисторный элемент в процессе сборки вводили в структуру пакета в различных местах и исследовали влияние положения сенсорного элемента в структуре углепластика на его чувствительность. Сенсорные элементы располагали по трем различным схемам в адаптирующемся углепластике – материале с несбалансированной структурой относительно выбранных осей анизотропии, которая (структура) при внешнем воздействии создает отличные от нуля суммарный вектор или суммарный момент относительно этих осей [3], что вызывает пространственную деформацию материала:



* Направление наибольшего растягивающего напряжения, возникающего на поверхности образца при консольном изгибе.

Полученные результаты показали, что для всех типов образцов наблюдается стабильное приращение электросопротивления от 0,1 до 0,3 Ом при приложении изгибающей нагрузки, а после снятия нагрузки – возврат к исходному значению. При этом способность к контролю деформаций в наибольшей степени проявилась сенсорными элементами с укладкой 15 град в адаптирующемся углепластике.

Органические (арамидные) волокна СВМ и Армос – полимерные волокна на основе структурированного ароматического полиамида – обладают плотностью 1430 кг/м³, высокой прочностью при растяжении: 3000–4500 МПа, модулем упругости при растяжении до 150 ГПа, удлинением при разрыве до 3,5–4,0%, а также высоким удельным электрическим сопротивлением ($10^{13} \div 10^{14}$ Ом·м) [4], 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 (г. Сморгонь). Установка обеспечивает предварительную откачку рабочего объема до давления 0,005 Па, оснащена системой газонапуска с обратной связью по общему давлению, планарными магнетронами с размером катода-мишени 500×100 мм и ускорителем ионов с анодным слоем (протяженность ионного пучка 500 мм, ионный ток до 0,4 А, средняя энергия ионов 300÷1000 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 об/мин.

Покрытия наносили на арамидные волокна с различной линейной плотностью (14,3; 29; 58,8 и 100 текс), закрепленные на технологической оснастке и высушенные до

постоянной массы при температуре 120°C. Электросопротивление нанесенного покрытия контролировали после каждого цикла.

Критерием оценки являлось электросопротивление покрытия на волокне, которое должно быть не менее 1 кОм. В табл. 1 приведены толщины и электросопротивление напыленного слоя при скорости вращения барабана 5 об/мин.

Толщина покрытия и его электросопротивление не зависят от типа арамидного волокна, а зависят лишь от продолжительности напыления. В ходе данного исследования были экспериментально определены режимы получения сенсорного элемента с заданным электросопротивлением (не менее 1кОм).

Таблица 1

Зависимость толщины и электросопротивления напыленного слоя от продолжительности напыления

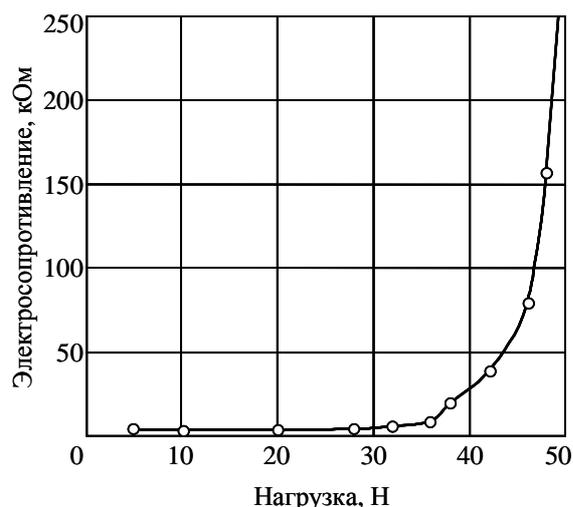
Характеристики	Значения характеристик при продолжительности напыления, мин			
	14	21	28	35
Толщина покрытия, нм	70	105	140	175
Электросопротивление, кОм	10–12	3–5	1–2	0,5–0,7

Результаты проведенных исследований получаемых сенсорных элементов с использованием нитей СВМ и Армос с токопроводящим никелевым покрытием представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры и свойства сенсоров на основе арамидных волокон

Тип нити (линейная плотность, текс)	Толщина токопроводящего слоя, нм	Электрическое сопротивление, кОм		Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
		начальное	перед разрушением		
СВМ (14,3)	140	20–100	150–900	3200	3,5
СВМ (29)	140	2–20	5–50	3100	3,5
СВМ (58,8)	140	2–10	10–30	3180	3,5
Армос (100)	70	10–30	100–200	4300	3,5
Армос (100)	105	5–15	20–70	4300	3,5
Армос (100)	140	1–3	5–10	4300	3,5



Зависимость электросопротивления сенсорного элемента на основе нити Армос (100 текс) от нагрузки

Зависимость электросопротивления сенсорного элемента на основе нити Армос (100 текс) от нагрузки приведена на рисунке.

Анализ результатов исследования зависимости электросопротивления сенсорного элемента от нагрузки показывает, что тензорезисторные датчики на основе арамидных нитей с никелевым покрытием обладают достаточно высокой информативностью, прочностью, механической и технологической совместимостью с основными компонентами металлокомпозита и удобны для снятия информации.

Применение разработанных сенсорных элементов при изготовлении органопластика не требует корректировки или изменения режимов формования.

Проведенные исследования сенсорных элементов (как углеродных – для угле-

пластика, так и на основе металлизированных арамидных волокон – для органопластика) показывают эффективность их применения в элементах высоконагруженных деталей, особенно в труднодоступных для прямого контроля местах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуняев Г.М., Машинская Г.П., Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А., Шапин Р.Е. Сенсоры для интеллектуальных и самоадаптирующихся композитов //Авиационные материалы и технологии. Вып. Полимерные композиционные материалы.– М.: ВИАМ. 2002. С. 45–49.
2. Будницкий Г.А. Армирующие волокна для композиционных материалов //Журнал ВХО им. Менделеева.– М.: Химия. 1989. Т. 34. №5. С. 438–446.
3. 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. статей Прочность, колебания, ресурс авиационных конструкций и сооружений //Труды ЦАГИ.– М.: ЦАГИ. 2002. Вып. 2658. С. 44–49.
4. Волохина А.В. Создание полимерных волокон нового поколения. //Химические волокна. 1994. №2. С. 64.

УДК 678.842

Т.С. Волкова, Э.Я. Бейдер

ПОЛИМЕРСИЛИКАТНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИСУЛЬФОНА, ПОЛУЧЕННЫЕ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Исследованы свойства полимерсиликатных нанокompозитов на основе конструкционного теплостойкого полимера аморфной структуры – полисульфона, модифицированного наносиликатом из семейства монтмориллонитов. Изучены данные РСА, проведен сравнительный анализ свойств полимерсиликатных нанокompозитов, полученных различными способами.

Ключевые слова: *полимерсиликатные нанокompозиты, наносиликат, полисульфон, свойства.*

Термопластичные полимерные материалы (термопласты) отличаются комплексом ценных технологических и эксплуатационных свойств. Это делает термопласты востребованными для изготовления изделий, применяемых во многих отраслях промышленности, в том числе электронной, автомобильной и авиационно-космической.

В настоящее время за рубежом в авиационной промышленности применяются такие пожаробезопасные термопласты, как полиэфиркетон, полифениленсульфид, полиэфиримид, обладающие комплексом высоких физико-механических свойств. Но в России из конструкционных теплостойких термопластов производятся только полисульфон и полиамид. Чтобы освоить выпуск в России применяемых за рубежом материалов, требуется создание новых дорогостоящих производственных мощностей.

Известны способы упрочнения термопластов путем введения в их состав рубленых органических, стеклянных и углеродных волокон. Однако волокна снижают деформационные свойства термопластов, значительно увеличивают износ оборудования и токсичность производства. Главное – они не снижают, а в некоторых случаях повышают горючесть термопластов.

Более перспективным представляется другое направление развития полимерных материалов – это модифицирование существующих полимеров.