

несенными на ПЭТФ пленку (ЭХС включает в себя гель-электролит, анодную и катодную электрохромные компоненты);

– адаптивных электролюминесцентных покрытий (АЭЛП) с яркостью свечения до  $600 \text{ кд/м}^2$  на основе светобумаги, работающей на переменном токе в режиме предпробойной электролюминесценции.

Основные характеристики некоторых разработанных материалов приведены в табл. 1 и 2.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение. 1973. 224 с.
2. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение. 1977. 264 с.
3. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник. Л.: Химия. 1984. 216 с.

А.А. БЕЛЯЕВ, С.В. КОНДРАШОВ,  
В.В. ЛЕПЕШКИН, А.М. РОМАНОВ

## РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Многочисленные электротехнические и электронные приборы стали обязательной принадлежностью современного летательного аппарата (ЛА), где может устанавливаться до нескольких десятков различных антенных систем, создающих в большей или меньшей степени электромагнитные помехи. С другой стороны, само радиотехническое оборудование чувствительно к различного рода электромагнитным воздействиям – как от другого оборудования, так и в результате отражения электромагнитных волн от расположенных рядом элементов конструкций. В результате таких воздействий возникают разного рода нарушения в работе оборудования, что вызывает необходимость решения такой проблемы, как электромагнитная совместимость (ЭМС).

ЭМС определяют как способность технических средств функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам, не оказывать неблагоприятного влияния на биологические объекты. Одним из эффективных способов борьбы с указанными проблемами является использование радиопоглощающих материалов (РПМ). Необходимо также отметить, что конструктор, размещающий антенные системы на ЛА, зачастую существенно ограничен в выборе места и условий их расположения. Это также вызывает необходимость использования радиопоглощающих материалов для уменьшения взаимовлияния этих систем.

Практически любой радиопоглощающий материал является как минимум двухкомпонентным, а зачастую многокомпонентным, композиционным материалом.

В настоящее время принято следующее деление радиопоглощающих материалов по назначению:

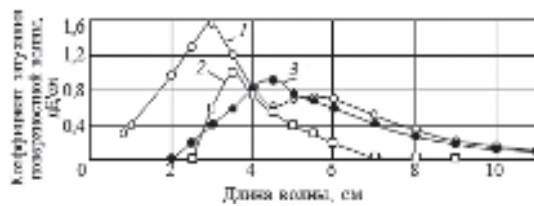
- радиопоглощающие покрытия;
- конструкционные радиопоглощающие материалы;
- экранирующие радиопоглощающие материалы.

**Радиопоглощающие покрытия** обычно изготавливаются на основе полимерного связующего и поглощающего наполнителя (сажа, углеродные волокна, магнитные порошки и т.п.). Для достижения наилучших радиотехнических свойств могут использоваться многокомпонентные системы, например эластомер, наполненный алюминиевой пудрой, и поглощающий наполнитель. Радиопоглощающие покрытия (РПП) могут наноситься на изделия или их элементы как в процессе изготовления, так и в период эксплуатации (т.е. использоваться при доработке уже имеющегося парка техники). К недостаткам таких покрытий следует отнести то, что они увеличивают массу и габарит техники при эффективности только в коротковолновой части сантиметрового диапазона.

**Конструкционные радиопоглощающие материалы (КРПМ)** представляют собой композиционные структуры и могут нести силовые нагрузки, поэтому существует возможность замены ими металлических несущих конструкций изделий (в ряде случаев со снижением массы детали) и снятие жестких ограничений на толщину (за счет углубления поглощающего слоя внутрь конструкции). К преимуществам конструкционных радиопоглощающих материалов следует отнести их эффективность в широкой полосе частот и возможность создания «толстых» материалов (с толщиной до 100 мм и более), стойких к внешним механическим воздействиям. К недостаткам конструкционных радиопоглощающих материалов следует отнести сравнительно высокую диэлектрическую проницаемость матрицы монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов и обшивок таких материалов с легким наполнителем. В то же время такие материалы позволяют обеспечить поглощение не только путем введения порошковых или волокнистых наполнителей, но и другими способами. Однако следует отметить, что на настоящий момент в России отсутствуют примеры применения конструкционных материалов в гражданской авиации, что, по-видимому, связано с тем, что о проблемах ЭМС задумываются на стадии, когда конструкция изделия уже сформирована и возможно применение только наносимых покрытий или экранирующих РПМ.

**Экранирующие радиопоглощающие материалы** используются для устранения отражений от внутренних отсеков, защищенных радиопрозрачными элементами от внешних воздействий (например, антенных отсеков или внутренних поверхностей кабин), а также для безэховых камер. В связи с этим предъявляемые к ним требования по физико-механическим свойствам существенно ниже, чем требования к РПП и КРПМ, и их можно конструировать по принципу градиентных РПМ с плавным согласованием входного слоя. В качестве экранирующих материалов можно использовать материалы диэлектрического типа, в структуру которых входит диэлектрическая матрица с резистивным наполнителем. Для уменьшения массы конструкции применяются листовые вспененные материалы или материалы на искусственных пенах, в качестве которых используются стеклянные микросферы. Материалы с наполнителем в виде микросфер наносятся непосредственно на объекте по лакокрасочной технологии. К таким материалам относятся ВРМ-1, ВРМ-3, ВРМ-4, ВРМ-6, ВРМ-7 и др.

Для ослабления поверхностных волн применяются материалы диэлектрического и магнитного типа. Предпочтение обычно отдается материалам магнитного типа, имеющим более широкую частотную характеристику (при заданном минимальном уровне коэффициента затухания поверхностной волны), значительно меньшую толщину и более желательную анизотропию.



**Рис. 1.** Экспериментальные графики зависимости коэффициента затухания поверхностной волны от длины волны для типовых радиопоглощающих покрытий:  
 1 – двухслойное покрытие ВРП-27 на магнитном наполнителе; 2 – однослойное покрытие типа ВРП-18; 3 – однослойное покрытие с избытком потерь типа ВРП-23

решать с помощью РПП резонансного типа, поглощающего поверхностную волну в полосе частот  $f_0 \pm 0,1f_0$ . Сужение частотного диапазона в данном случае позволяет отказаться от высоконаполненных композиций на основе карбонильного железа и в значительной степени снизить массу РПП.

В ВИАМ разработаны радиопоглощающие покрытия ВРП-13 и ВРП-14 с низким содержанием карбонильного железа и алюминиевой пудры (не более 8–10% объемн.) для повышения диэлектрической проницаемости покрытия и соответственно уменьшения толщины до 1,1–1,2 мм и удельной плотности до 1,5–2 г/см<sup>3</sup>.

Для подавления поверхностных волн в широкой полосе частот необходимо использовать покрытия магнитоэлектрического типа с избыточными потерями. К ним относятся РПП типа ВРП-18, ВРП-20, ВРП-22, ВРП-23. Все эти покрытия относятся к классу покрытий с магнитными потерями и имеют сравнимые радиотехнические характеристики по уровню коэффициента затухания и полосе частот, но в значительной степени отличаются своими матрицами и физико-механическими свойствами. Такие РПП при толщине 1,2–1,3 мм позволяют реализовать заданные требования по коэффициенту затухания в диапазоне частот 2,5–10 ГГц. Главным недостатком таких РПП является наличие срыва поверхностной волны в коротковолновой области, где они неэффективны как поглотители поверхностных волн (табл. 1).

тропию свойств. Однако для ЛА большое значение имеет также весовая характеристика применяемых материалов, а при оценке по ней преимущества имеют материалы диэлектрического типа.

На рис. 1 приведены экспериментальные графики зависимости коэффициента затухания поверхностной волны от длины волны для типовых радиопоглощающих покрытий.

Задачу ЭМС на фиксированной частоте  $f_0$  целесообразно

Таблица 1

Характеристики типовых радиопоглощающих материалов

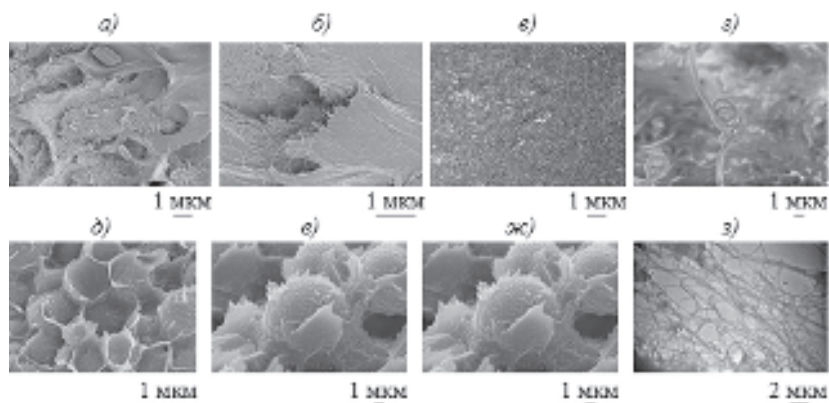
Материал	Частотный диапазон, МГц, по уровню коэффициента отражения –10 дБ	Минимальный коэффициент отражения, дБ	Удельная плотность, г/см <sup>3</sup>	Максимальный коэффициент поверхностного затухания, дБ/см	Технология изготовления
ВРП-13	8000–11000	–13	3,1	0,6	Напыление Напыление Прессование Напыление, кисть
ВРП-18	9370–10500	–18 ÷ –20	3,8	0,9	
ВРМ-1	8000–13000	–20	0,35	0,6	
ВРМ-4	8000–12000	–17 ÷ –18	0,6	0,6	
ВРМ-7	8000–11000	–18 ÷ –21	0,65	0,4	

Для нанесения покрытий используются различные технологии изготовления материалов. Материалы магнитоэлектрические (типа ВРП-13, ВРП-14, ВРП-23, ВРМ-3, ВРМ-6 и др.) формируются непосредственно на элементах изделия методами лакокрасочной технологии, пневмомеханического напыления или кистевым с отверждением при комнатной температуре. Материалы типа ВРМ-1 и ВРМ-2 (листовые диэлектрические материалы) получают вспениванием в закрытой пресс-форме при определенном температурном режиме, а затем наклеивают на элементы изделия. Типичными экранирующими РПМ являются материалы на основе одного (ВРБ-3-80) или нескольких слоев из вспененного неорганического волокна (ВРБ-3), предназначенные для оснащения безэховых камер с высокими потребительскими свойствами. Разработаны облегченные напыляемые многофункциональные, радиопоглощающие материалы ВРМ-6 и ВРМ-7, с регулируемой диэлектрической постоянной матрицы, повышенной климатической и микробиологической стойкостью:

Коэффициент отражения на резонансной частоте, дБ	$-19,5 \pm 1,5$
Плотность материала, г/см <sup>3</sup>	$0,65 \pm 0,05$
Толщина материала, мм	$2,5 \pm 0,1$
Рабочий диапазон температур, °С	$-60 \div +180$
Микробиологическая стойкость	до 1 балла.

#### **Исследование возможности построения наноструктурированных радиопоглощающих материалов**

В настоящее время активно ведутся исследования наполнителей\*, разработанных на основе нанотехнологий, с целью создания радиопоглощающих материалов с высокими радиотехническими и физико-механическими свойствами. Проводятся исследования влияния структурной организации нанотрубок – архитектуры ансамбля нанотрубок – на радиоэкранирующие и электропроводящие свойства нанокомпозитов, приготовленных с использованием идентичных (аспектное соотношение, наличие дефектов) углеродных нанотрубок (УНТ).



**Рис. 2.** Структуры нанокомпозитов, исследованные методами СЭМ и ПЭМ

\* Акатенков Р.В., Аношкин И.В., Беляев А.А., Битт В.В., Богатов В.А. и др. Влияние структурной организации углеродных нанотрубок на радиоэкранирующие и электропроводящие свойства нанокомпозитов // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 1. С. 35–42.

На рис. 2 приведены результаты исследования полученных нанокompозитов методами ПЭМ и СЭМ. Содержание УНТ во всех образцах составляет 1% (по массе).

В табл. 2 приведены измеренные значения величин действительной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  частей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\epsilon$  для ряда исследованных нанокompозитов (концентрация УНТ: 1% по массе) при частоте 10 ГГц. Приведены также значения коэффициентов ослабления для экранов из этих композитов толщиной 2 мм, рассчитанные по измеренным значениям составляющих комплексной диэлектрической проницаемости. Диаметр исходных УНТ и УНТ<sub>фгф</sub> составляет 20–30 нм.

Таблица 2

Результаты измерений диэлектрических свойств нанокompозитов

Нанокompозит	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\operatorname{tg}\epsilon$	Коэффициент ослабления, дБ
ПСК/УНТ <sub>исх</sub>	5,01	0,81	0,16	2,6
ПСК/УНТ <sub>фгф</sub>	5,48	1,01	0,18	3,0
ПСК/УНТ <sub>кф</sub>	4,06	0,62	0,15	1,92
ЭС/ПСК/УНТ <sub>фгф</sub>	5,91	1,8	0,3	3,86
СК/УНТ <sub>фгф</sub>	7,21	2,95	0,4	5,15
ПСК/УНТ <sub>фгф</sub> (Л)	5,0	0,56	0,15	2,4

Анализ представленных результатов показывает, что значения диэлектрических констант и тангенса потерь представленных композитов существенно различаются при одной и той же концентрации активного наполнителя. Расчет ослабления ЭМИ (в дБ) на частоте 10 ГГц образцами толщиной 2 мм показывает, что величина ослабления возрастает в ряду: ПСК/УНТ<sub>кф</sub>, ПСК/УНТ<sub>фгф</sub> (Л), ПСК/УНТ<sub>исх</sub>, ЭС/ПСК/УНТ<sub>фгф</sub>, СК/УНТ<sub>фгф</sub>.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о перспективности разработки и использования наполнителей, созданных на основе нанотехнологий, с целью создания новых более эффективных радиопоглощающих материалов.

### Математическое моделирование

В ВИАМ при разработке радиопоглощающих и звукопоглощающих материалов широко используется математическое моделирование многослойных структур. Разработанный математический вычислительный аппарат позволяет рассчитывать радиотехнические характеристики плоскопараллельных, в том числе и многослойных, радиопоглощающих структур (коэффициент отражения и прохождения при падении излучения под различными углами). На основе вычислительного аппарата создана программа оптимизации физических параметров радиопоглощающих структур, при которых достигается возможное снижение коэффициентов отражения. Намечены пути математической оптимизации радиопоглощающих структур.