

УДК 629.7.023.222:535.23

К.Л. Девин¹, А.С. Агафонова¹, И.И. Соколов¹

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ БОРТОВОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-94-100

Рассмотрены вопросы в области создания радиопоглощающих материалов (РПМ) в целях решения проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) в современных летательных аппаратах (ЛА). Приведены характеристики ряда РПМ, разработанных во ФГУП «ВИАМ», предназначенных для обеспечения согласования и работоспособности авиационных антенных систем и обеспечения ЭМС бортового радиоэлектронного оборудования в СВЧ-диапазоне. Представленные в работе материалы различаются по своим массогабаритным характеристикам, рабочему диапазону частот, способу крепления (нанесения/установки) и имеют различное назначение по применению на ЛА.

Ключевые слова: радиопоглощающий материал, бортовое радиоэлектронное оборудование, электромагнитная совместимость, стеклопластик, полимерный композиционный материал, радиопоглощающее покрытие.

K.L. Devin¹, A.S. Agafonova¹, I.I. Sokolov¹

PROSPECTS FOR THE USE OF RADIO-ABSORBING MATERIALS TO ENSURE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF AVIONICS

The article is devoted to issues in the field of creation of radar absorbing materials (RAM) in order to solve the problem of electromagnetic compatibility (EMC) in modern aircrafts. The characteristics of a number of RAM developed at FSUE «VIAM» are provided that are designed to ensure coordination and operability of aircraft antenna systems and to provide EMC for on-board radio-electronic equipment in the microwave range. The materials presented in the work differ in their overall dimensions, operating frequency range, method of attachment (application/installation) and have different purposes for use on aircrafts.

Keywords: radar absorbing material, avionics, electromagnetic compatibility, fiberglass, polymer composite material, radar absorbing coating.

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

Одна из неотъемлемых частей современной авиационной техники – это бортовое радиоэлектронное оборудование. Его базовыми элементами являются системы навигации, коммуникации и управления. Для новейших летательных аппаратов (ЛА) свойственна высокая степень насыщения радиоэлектронным оборудованием. Современный этап развития авиационного приборостроения характеризуется стремлением к комплексированию различных радиотехнических бортовых систем с целью повышения их точности и надежного функционирования.

Следует отметить, что выполнение требований по массогабаритным характеристикам радиопоглощающих материалов (РПМ) является приоритетным при создании новых образцов современных ЛА. Как правило, компоновка бортового радиоэлектронного оборудования на перспективных летательных аппаратах – сложная

инженерная задача, включающая в себя множество факторов и ограничений, в том числе связанных с выбором места размещения аппаратуры и антенных систем в условиях лимитированного пространства внутри фюзеляжа, крыльев и хвостового оперения. Неизбежным результатом всех этих ограничений становится необходимость плотного размещения радиоэлектронных средств в едином технологическом, функциональном и конструктивном пространстве [1–3].

В связи с активными темпами развития науки, новых технологий, материалов и элементной базы бортовая радиоэлектронная аппаратура с каждым годом становится технически все сложнее. Увеличивается степень интеграции радиоэлектронных компонентов, повышается их чувствительность и восприимчивость к различным непреднамеренным электромагнитным воздействиям, возникающим при функционировании радиоэлектронной аппаратуры. Воздействие электромагнитного излучения (ЭМИ) может стать причиной сбоя или выхода из строя высокочувствительного оборудования. Все это обостряет проблему электромагнитной совместимости (ЭМС), которая в настоящее время относится к числу одной из важнейших в электроэнергетике – как в теоретическом, так и в прикладном плане. Невыполнение требований ЭМС на стадии проектирования летательных аппаратов может иметь достаточно серьезные последствия [4, 5].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15. «Наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия», комплексной научной проблемы 15.3. «Материалы и покрытия для защиты от ЭМИ, ударных, вибрационных, акустических и электрических воздействий» стратегического направления («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6–8].

Материалы и методы

К одному из эффективных способов обеспечения ЭМС относят использование радиопоглощающих материалов (РПМ). Не являясь экранирующими материалами, РПМ способны значительно уменьшить паразитную связь между элементами аппаратуры в тех случаях, когда применение традиционных экранирующих средств становится недостаточно эффективным [9].

В тех случаях, когда размещение РПМ во внутреннем объеме аппаратуры затруднено, материалы применяются на внешней поверхности, полностью или частично охватывающей защищаемый объем. Такой подход позволяет устранить области интенсивного переотражения электромагнитной волны, а также обеспечить поглощение поверхностных токов, являющихся источником вторичных излучений [10].

С технологической точки зрения РПМ можно условно разделить на две большие группы. Первая группа – это радиопоглощающие покрытия (РПП), наносимые на изделия или их элементы как в процессе изготовления, так и в период эксплуатации. Ко второй группе относятся предварительно формируемые РПМ, которые используются для изготовления элементов конструкции или закрепляются на внутренних поверхностях конструкций летательного аппарата. В зависимости от принципа взаимодействия с электромагнитной волной РПМ также условно можно классифицировать на материалы с диэлектрическими и магнитодиэлектрическими потерями, а по рабочему частотному диапазону – на материалы узкополосные и широкополосные [11, 12].

Вид используемых РПМ и способы применения определяются требованиями к их рабочему диапазону частот и необходимому уровню эффективного поглощения ЭМИ, а также массогабаритными и прочностными характеристиками и стойкостью

к внешним воздействующим факторам. Таким образом, для достижения всех заданных требований при обеспечении ЭМС бортовой радиоэлектронной аппаратуры ЛА необходим широкий спектр разнообразных материалов и покрытий при достижении всех заданных требований [13].

Материал с распределенным по объему поглощающим наполнителем представляет собой неоднородный материал. При определении эффективности его работы целесообразно пользоваться «рупорным» методом измерения, который дает возможность определять усредненный коэффициент отражения ЭМИ от облучаемой поверхности материала. Процесс измерения рассматривается как имитация падения плоской электромагнитной волны на участок поверхности образца под прямым углом, что дает возможность оценить вклад зеркальной составляющей рассеянного излучения. Во ФГУП «ВИАМ» разработана методика по оценке эффективности радиопоглощающих характеристик материалов МИ 1.2.047–2012 «Методика измерений по оценке коэффициента отражения в свободном пространстве в диапазоне частот от 0,1 до 40,0 ГГц» (Федеральный реестр №ФР1.37.2012.13172).

Результаты и обсуждение

Во ФГУП «ВИАМ» разработан и внедрен ряд РПМ, предназначенных для обеспечения согласования и работоспособности авиационных антенных систем и обеспечения электромагнитной совместимости бортового радиоэлектронного оборудования в СВЧ-диапазоне.

Один из способов решения задачи ЭМС связан с применением РПМ в заантенном пространстве внутренних отсеков ЛА. Для коррекции характеристик антенных систем, работающих на нескольких частотах, целесообразно использовать материалы, обеспечивающие поглощение электромагнитной волны в широком диапазоне частот. Такому требованию в полной мере отвечают РПМ диэлектрического типа.

К указанным материалам можно отнести РПМ, использующие в качестве электропроводящего наполнителя частицы различных геометрических форм и размеров, обладающие диэлектрическими потерями в радиолокационном диапазоне длин волн. Форму частиц условно подразделяют на три основных типа: сферическая, пластинчатая и иглообразная. Как правило, большей эффективностью обладают материалы, наполненные частицами последнего типа. Представителем таких частиц является дискретное углеродное волокно, которое широко используется при получении РПМ. Выбор углеродного волокна в качестве радиопоглощающего наполнителя обусловлен тем, что при соотношении длины волокна порядка нескольких миллиметров к его диаметру, составляющему от 5 до 10 мкм, объемное содержание наполнителя в материале может достигать всего нескольких процентов, что достаточно для эффективного поглощения ЭМИ в широком диапазоне частот [13–15].

К РПМ диэлектрического типа с наполнителем в виде дискретного углеродного волокна можно отнести материал марки ВРМ-1, разработанный во ФГУП «ВИАМ». Материал изготавливают в виде калиброванных листов (пластин) путем вспенивания полиуретановой композиции в закрытой пресс-форме при варьировании определенных температурных режимов. Полимерная матрица фиксирует равномерное распределение дискретного волокна в объеме материала. Правильность подбора наполнителя по его электрическим свойствам, длине и концентрации позволило обеспечить значения коэффициента отражения ЭМИ на уровне не более -10 дБ в диапазоне частот от 8,0 до 13,0 ГГц при толщине материала не более 4 мм. Благодаря вспененной структуре плотность материала составляет всего 0,35 г/см³. Основные свойства РПМ марки ВРМ-1:

Толщина, мм	3,8±0,2
Плотность, г/см ³	0,35±0,05
Диапазон рабочих частот, ГГц	От 8 до 13
Коэффициент отражения, дБ (не более)	-10,0
Коэффициент отражения на резонансной частоте, дБ (не более)	-13,0
Предел прочности при растяжении при температуре 20 °С, МПа (не менее)	2,0
Предел прочности при равномерном отрыве от металла Д16 при температуре 20 °С, МПа (не менее)	0,44
Интервал рабочих температур, °С	От -60 до +120

Отличительной особенностью материала является его однородность, т.е. электрофизические характеристики не претерпевают существенных изменений в направлении от поверхности вглубь материала. Расширение частотного диапазона работоспособности РПМ с диэлектрическими потерями, при ограничениях по толщине, может быть обеспечено за счет изменения комплексной диэлектрической проницаемости по толщине материала (градиента). Такой подход обеспечивает согласование волновых сопротивлений внешнего слоя материала и свободного пространства. Для снижения уровня ЭМИ, отраженного от границы раздела двух сред, применяют многослойные материалы со слоисто-неоднородной структурой. Получение подобного РПМ подразумевает изготовление отдельных слоев материала с различными электрофизическими характеристиками и толщиной с последующим их сбором в единую конструкцию. Внешний слой конструкции содержит минимальное количество дискретного электропроводящего наполнителя, следовательно, обладает более низкими значениями комплексной диэлектрической проницаемости. В каждом последующем слое материала концентрация электропроводящего наполнителя возрастает. Количество слоев в материале варьируется в зависимости от ограничений по габаритным показателям ЛА и заданному уровню поглощения ЭМИ в диапазоне рабочих частот [16–18].

В конструкциях современных ЛА достаточно широко используются полимерные композиционные материалы, в частности стеклопластики, которые отличаются высокой удельной прочностью, возможностью управления структурой и получения изделий сложной формы. В качестве материала для обеспечения ЭМС бортового оборудования может быть рассмотрен РПМ конструкционного назначения марки ВРМ-12. Материал представляет собой монолитный стеклопластик, наполненный дискретным углеродным волокном. Его отличительной особенностью является то, что он представляет собой градиентную структуру из слоев наполненного стеклопластика, полученного путем прессования пакета препрегов, что позволяет рекомендовать его для обеспечения ЭМС бортового радиоэлектронного оборудования и защиты от несанкционированного воздействия ЭМИ в широком диапазоне частот (от 2,5 до 15,0 ГГц). Данный материал может выступать в качестве отдельных частей внутренних элементов фюзеляжа летательного аппарата или перегородок между отдельными внутренними отсеками с бортовым радиоэлектронным оборудованием. Основные свойства РПМ марки ВРМ-12:

Плотность, г/см ³	1,7–1,8
Диапазон рабочих частот, ГГц	От 2,5 до 15,0
Коэффициент отражения, дБ (не более)	-10,0
Коэффициент отражения на резонансной частоте, дБ (не более)	-15,0
Предел прочности при растяжении при температуре 20 °С, МПа (не менее)	538
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, МПа (не менее)	600
Предел прочность при изгибе при температуре 20 °С, МПа (не менее)	495
Интервал рабочих температур, °С	От 0 до 120

Для обеспечения функциональности сверхширокополосных систем необходимо применение РПМ, оптимально обеспечивающих поглощение электромагнитной энергии с учетом дисперсии их электрических и магнитных характеристик. Такие материалы представляют собой многослойные интерференционные РПП с принципом работы, основанном на полном или частичном взаимном гашении падающей и отраженной от металлизированной поверхности электромагнитной волны. В данном случае покрытие выполняет задачу по снижению отражения ЭМИ от металлических и металлизированных деталей как внутри корпуса ЛА, так и снаружи. Покрытия наносят на защищаемые металлизированные поверхности методами лакокрасочной технологии: вручную (кистью) или механизированным способом (краскораспылителем). При формировании РПП, для обеспечения широкого диапазона рабочих частот, используют технологию нанесения нескольких слоев покрытия по принципу уменьшения значений магнитной и диэлектрической проницаемости каждого последующего слоя покрытия в сторону от металлизированной поверхности, на которую их наносят [19].

В современных разработках тонкослойных материалов, поглощающих ЭМИ в широком диапазоне частот, используются главным образом традиционные мелкодисперсные наполнители на основе металлов или дискретных углеродных волокон. Выбор связующего является отдельной задачей и зависит в основном от эксплуатационных требований и особенностей применения ЛА. В настоящее время широкое распространение получили РПП на основе серийно выпускаемого карбонильного радиотехнического железа, обладающие магнитными потерями и эффективно поглощающие ЭМИ в СВЧ-диапазоне [11, 13].

Материал марки ВРП-18 является типичным представителем РПП с магнитодиэлектрическими потерями. Покрытие формируется из наполненной карбонильным железом полимерной матрицы холодного отверждения и может быть нанесено на защищаемую внешнюю или внутреннюю поверхность как в процессе изготовления, так и в период эксплуатации. При варьировании содержания поглощающего наполнителя и толщины покрытия возможна корректировка рабочих диапазонов частот под требования ЭМС бортового радиоэлектронного оборудования. Толщина покрытия составляет от 1 до 3 мм для работы в сантиметровом диапазоне длин волн, при этом материал марки ВРП-18 характеризуется высокой адгезией к защищаемым поверхностям, рабочей температурой эксплуатации до 250 °С и кратковременно – до 300 °С. Основные свойства РПМ марки ВРП-18:

Плотность, г/см ³	3,6–3,8
Рабочий диапазон длин волн, ГГц	Варьируется
Коэффициент отражения на резонансной частоте, дБ	Варьируется
Предел прочности при растяжении, МПа, при температуре, °С:	
-60	7,5
23	3,2–4,2
250	1,0
Относительное удлинение при разрушении, %, при температуре, °С:	
-60	54
23	40
250	4
Адгезионная прочность к стали Ст4 (в состоянии поставки), МПа, при температуре, °С:	
-60	4
23	3,3
250	0,6

Адгезионная прочность к титану опескоструенному, МПа, при температуре, °С:

-60	2,6
23	2,4
250	0,5

Адгезионная прочность к анодированному алюминиевому сплаву, МПа, при температуре, °С:

-60	3,4
23	2,0
250	0,5

Материал марки ВРП-18 предназначен для устойчивости работы бортовой аппаратуры ЛА в условиях воздействия внешних и внутренних электромагнитных излучений СВЧ-диапазона. Как правило, РПП применяют для обеспечения развязки между корпусными антенными системами с целью подавления поверхностных волн. Покрытие наносят непосредственно на поверхность методом пневмомеханического напыления. Достоинством этого подхода является технологичность получения РПП с различной концентрацией проводящей фазы и возможность оптимизации покрытия под различные формы конструкции ЛА.

Заключения

Разработанные во ФГУП «ВИАМ» радиопоглощающие материалы различаются по своим массогабаритным характеристикам, рабочему диапазону частот, способу крепления (нанесения) и имеют разное назначение по применению на авиационной технике для обеспечения ЭМС бортового радиоэлектронного оборудования. При конструировании ЛА все эти особенности принимают к сведению и затем выбирают оптимальный вариант покрытия или материала исходя из возможностей их использования. Следует отметить, что на основе представленных типовых РПП могут быть разработаны материалы, отвечающие специальным требованиям по радиотехническим характеристикам и частотному диапазону.

Библиографический список

1. Парамонов П.П., Жаринов И.О. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. №2 (84). С. 1–17.
2. Клягин В.А., Петрова И.А., Шкурин М.В. Анализ размещения блоков бортового радиоэлектронного оборудования на самолетах различных типов // Труды МАИ. 2017. №95. URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=84442> (дата обращения: 01.11.2019).
3. Коптев А.Н. Авиационное и радиоэлектронное оборудование воздушных судов гражданской авиации. Самара: Изд-во СГАУ, 2011. 196 с.
4. Беспалова Е.Е., Беляев А.А., Широков В.В. Радиопоглощающие материалы для СВЧ-излучения высокой мощности // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №3. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-7-7.
5. Романов А.М., Беляев А.А., Широков В.В. Особенности оптимизации резонансных радиопоглощающих материалов немагнитного типа // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №11. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-5-5.
6. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Перфилова Д.Н. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице // Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. №10. С. 61–71.

7. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
8. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья родины*. 2016. №5. С. 8–18.
9. Богущ В.А., Борботько Т.В., Гусинский А.В. и др. *Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты*. Минск: Бестпринт, 2003. 401 с.
10. Михайлин Ю.А. *Специальные полимерные материалы*. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 660 с.
11. Алексеев А.Г., Штагер Е.А., Козырев С.В. *Физические основы технологии stealth*. СПб.: ВВМ, 2007. 284 с.
12. Ковнеристый Ю.К., Лазарев И.Ю., Раваева А.А. *Материалы, поглощающие СВЧ-излучения*. М.: Наука, 1982. 162 с.
13. Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона // *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48. №2. С. 196–209.
14. Симамура С., Синдо А., Коцука К. и др. *Углеродные волокна: пер. с япон.* М.: Мир, 1987. 304 с.
15. Фитцер Э. *Углеродные волокна и углекомпози́ты: пер с англ.* М.: Мир, 1988. 336 с.
16. Девин К.Л., Борцов А.Н., Девина Е.А. Градиентный поглотитель электромагнитных волн // *Перспективные материалы*. 2018. №9. С. 79–84.
17. Беспалова Е.Е., Бе́ляев А.А., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик слоев многослойного радиопоглощающего материала для безэховых камер на основе вспененного асбеста, наполненного науглероженным волокном // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2014. №8. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-12-12.
18. Агафонова А.С., Бе́ляев А.А., Кондрашов Э.К., Романов А.М. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 56–59.
19. Берховских Л.М. *Волны в слоистых средах*. М.: Наука, 1973. 343 с.