

А.С. Агафонова<sup>1</sup>, А.А. Беляев<sup>1</sup>, Э.К. Кондрашов<sup>1</sup>, А.М. Романов<sup>1</sup>

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ РЕЗИСТИВНЫМ ВОЛОКНОМ

*Описаны особенности формирования конструкционных радиопоглощающих материалов на основе стеклопластиков, наполненных резистивным волокном. Структура и рецептура КРПМ определяются с помощью математического моделирования и оптимизации. В статье приведены результаты исследования прочностных характеристик стеклопластиков, а также результаты экспериментальной проверки радиотехнических характеристик на образцах материала в широком диапазоне частот.*

**Ключевые слова:** радиопоглощающий материал, науглероженное волокно, стеклопластик.

A.S. Agafonova<sup>1</sup>, A.A. Belyaev<sup>1</sup>, E.K. Kondrashov<sup>1</sup>, A.M. Romanov<sup>1</sup>

## FEATURES OF THE FORMATION OF MONOLITHIC STRUCTURAL RADIO ABSORBING MATERIALS BASED ON COMPOSITES FILLED WITH RESISTIVE FIBERS

*Features of formation of structural radio absorbing materials based on glass-reinforced plastics filled with resistive fiber are described. The structure and composition of SRAM were determined by mathematical modeling and optimization. Results of research of strength characteristics of glass-reinforced plastics and results of experimental verification of radio engineering characteristics with the use of material samples within a wide range of frequencies are given in the paper as well.*

**Keywords:** radio absorbing material, carburized fiber, glass-reinforced plastic.

---

<sup>1</sup> Федеральное 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

В настоящее время на летательных аппаратах (ЛА) расположено большое количество блоков радиоэлектронной аппаратуры с антеннами и в результате одни блоки могут вносить помехи в работу других блоков, снижая надежность их работы, что может нарушить безопасность полетов. Проникновение помех может происходить через антенны, по проводам и непосредственно через корпуса электронных блоков. Поэтому становится актуальной проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) на борту ЛА.

В последнее время проблеме ЭМС на транспортных средствах посвящено много научных публикаций [1–5]. В них описана в основном природа взаимных помех и методы их измерений. К техническим мерам обеспечения ЭМС относятся: экранирование, разнос взаимно мешающих средств, установка электрических и пространственных фильтров, применение радиопоглощающих материалов [6].

Применение в качестве радиопоглощающих материалов радиопоглощающих покрытий (РПП) приводит к изменению теоретического контура ЛА в случае применения материала снаружи и всегда приводит к увеличению веса. Последнее обстоятельство приводит к ограничению толщины РПП и, соответственно, – к ограничению диапазона длин волн (частот), так как максимальная длина волны диапазона при уровне коэффи-

циента отражения не более -10 дБ для немагнитных материалов равна примерно восьмикратной толщине РПП. Применение магнитных материалов позволит уменьшить толщину покрытия, но из-за большой их плотности вес РПП значительно будет увеличен.

В то же время нарастает тенденция к замене металлов на пластики в конструкциях ЛА [7–11]. При толщине конструкции, обеспечивающей равную прочность с металлами, получается выигрыш в весовых характеристиках. Элементы ЛА из пластиков можно использовать в качестве основы конструкционных радиопоглощающих материалов (КРПМ), которые в отличие от наносимых РПП не приведут к увеличению веса ЛА. Наиболее высокими прочностными характеристиками обладают углепластики (прочность на разрыв при растяжении 1200-2000 МПа, при сжатии 1700 МПа). Но их нельзя использовать как основу КРПМ, так как они обладают слишком большой электропроводностью, что приводит к большому уровню отражения от границы раздела этих материалов с воздухом. Приемлемым пластиком для использования в качестве основы КРПМ являются стеклопластики на основе эпоксидного связующего [12]. Их модуль Юнга не ниже 25 ГПа, прочность при растяжении не ниже 550 МПа, при сжатии не ниже 440 МПа, при изгибе не ниже 570 МПа. Имеются публикации по применению электропроводящих элементов (углеродные нанотрубки) в составе композиционных полимерных материалов [13, 14].

Использование конструкционного высокопрочного материала на основе монолитного стеклопластика в качестве матрицы гетерогенной системы, наполненной углеродсодержащим наполнителем, позволило при правильном выборе наполнителя по его электрическим свойствам, конфигурации частиц и концентрации получить КРПМ практически без увеличения веса изделия при прочностных характеристиках стеклопластика.

Известные за рубежом [15, 16] и у нас КРПМ [17] состоят из конструкционных слоев, которые не являются радиопоглощающими, отдельных радиопоглощающих диэлектрических слоев и резистивных прослоек. В ВИАМ предложен КРПМ [18], представляющий собой стеклопластик, в связующее которого в небольшом количестве (в объеме не более 1% по отношению к объему стеклопластика) введено науглероженное волокно. Науглероженное волокно вводится в связующее во всех слоях стеклопластика, возможно, кроме нескольких входных. Таким образом, в отличие от упомянутых известных КРПМ, каждый слой является и конструкционным и радиопоглощающим. При этом содержание науглероженного волокна возрастает от минимального значения на входной поверхности по мере удаления от нее.

Плотность и прочностные характеристики этого КРПМ приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

**Плотность и прочностные характеристики конструкционных радиопоглощающих материалов (КРПМ)**

Характеристика	Значения характеристик
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1785–1810
Предел прочности, МПа:	
при растяжении	538–568
при изгибе	495–600
при сжатии	600–660
Модуль упругости, ГПа	22–23

Радиопоглощающим наполнителем в нем являются углеродсодержащие добавки, распределенные в связующем между слоями стеклоткани. В данной статье рассматриваются КРПМ с наполнителем в виде углеродсодержащего волокна.

Выбор углеродсодержащего волокна в качестве радиопоглощающего наполнителя обусловлен тем, что при большом отношении длины волокна к диаметру (более

сотен) объемное содержание добавок порядка десятых и сотых долей процента может быть достаточным для эффективного поглощения электромагнитной энергии в широком диапазоне частот. При таком содержании добавки не повлияют на прочностные характеристики стеклопластика. В случае применения добавок в виде частиц с центральной симметрией (ацетиленовая сажа или графит) их объемное содержание должно составлять более 10%, что может привести к ухудшению прочностных характеристик пластика. В данной статье отражены результаты исследования радиотехнических характеристик КРПМ на основе стеклопластиков, наполненных науглероженным волокном типа «Углен».

Для широкополосных монолитных КРПМ степень снижения уровня отражения от КРПМ ограничена большой величиной диэлектрической проницаемости стеклопластика (относительная величина 3,8–5), что вызывает большой уровень отражения на границе раздела входная поверхность материала – свободное пространство. При нормальном падении электромагнитной волны на плоский образец количественно этот уровень определяется величиной коэффициента отражения по мощности –  $R_{0p}$  на границе раздела «входная поверхность материала–свободное пространство»:

$$R_{0p} = |R_{0E}|^2 = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{вх}}}{1 + \sqrt{\epsilon_{вх}}} \right|^2 = \frac{(1 - \operatorname{Re}(\sqrt{\epsilon_{вх}}))^2 + (\operatorname{Im}(\sqrt{\epsilon_{вх}}))^2}{(1 + \operatorname{Re}(\sqrt{\epsilon_{вх}}))^2 + (\operatorname{Im}(\sqrt{\epsilon_{вх}}))^2}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_{вх}$  – диэлектрическая проницаемость материала образца вблизи границы раздела «входная поверхность материала–свободное пространство».

Значение коэффициента отражения от образца ниже  $R_{0p}$  можно получить путем компенсации поля отраженной от входной поверхности волны полем волны, прошедшей в образец и отраженной от металлического экрана. Но это возможно только в узкой полосе частот. В широкой полосе частоты, на которых напряженности полей отраженных волн компенсируют друг друга, будут чередоваться с частотами, на которых поля отраженных волн суммируются, и суммарный коэффициент отражения значительно превышает уровень отражения волны от входной поверхности  $R_{0p}$  (превышение до 6 дБ). Поэтому при разработке КРПМ на основе стеклопластиков целесообразно исходить из следующих принципов:

- стеклопластик должен иметь диэлектрическую проницаемость, минимально возможную при заданных требованиях по прочностным характеристикам;
- содержание радиопоглощающих элементов в прослойках и закон его изменения по толщине структуры КРПМ должны обеспечивать плавный рост мнимой части эквивалентной диэлектрической проницаемости по мере удаления от входной поверхности и максимальное затухание при прохождении электромагнитной энергии от входа КРПМ до металлического экрана и обратно;
- дисперсионная зависимость должна обеспечить равномерное по заданному диапазону частот поглощение энергии электромагнитной волны при прохождении от входной поверхности до металлического экрана и обратно, не вызывая заметных отражений внутри структуры.

При выполнении указанных принципов при достаточной толщине КРПМ коэффициент отражения во всем частотном диапазоне будет близок к величине  $R_{0p}$  (в дБ  $R_{0p\text{дБ}}=10 \cdot \lg R_{0p}$ , дБ). При указанных пределах диэлектрической проницаемости величина  $R_{0p\text{дБ}}$  находится в пределах от -10 до -8,5 дБ. Но, применяя метод оптимизации, в пятишестикратном диапазоне частот можно получить коэффициент отражения не выше -10 дБ.

С помощью соотношения, полученного в работе [19] для многослойной структуры,

$$|\ln R_p|(\lambda_{\max}-\lambda_{\min}) < 2\pi^2 \sum_i \mu_i d_i, \quad (2)$$

где  $R_p$  максимальный коэффициент отражения по мощности;  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$  – максимальная и ми-

нимальная длина волны диапазона;  $\mu_i$  – относительная магнитная проницаемость каждого  $i$ -го слоя;  $d_i$  – его толщина (для немагнитных материалов вместо суммы в правой части будет полная толщина структуры материала  $d$ ), для диапазона длин волн 2–12 см при максимальном коэффициенте отражения по мощности не выше 0,1 (10% или -10 дБ) была выбрана толщина немагнитного материала 12–12,5 мм, для диапазона 2–10 см выбрана толщина 10,5–11,5 мм.

С помощью программы численной оптимизации, разработанной в ВИАМ, с использованием работ [20] (при расчете диэлектрической проницаемости) и [21] (при расчете коэффициентов отражения) были получены оптимальные значения числа и толщины слоев структуры КРПМ на основе стеклопластика, а также оптимальные значения концентрации науглероженного волокна в слоях и его длины. В табл. 2 приведены измеренные значения коэффициентов отражения при нормальном падении в диапазоне 2–12 см при толщине структур 12,5 и 11 мм. Измерения были проведены с помощью векторного анализатора цепей ZVB-20 (Rohde & Schwarz), рупорной антенны Пб-23А и специально изготовленной рупорной антенны для диапазона в области 15 ГГц. В процессе обработки результатов измерений величина коэффициента отражения образцов была выделена из общего коэффициента отражения образца и антенны в соответствии с методом разработанным ВИАМ.

Таблица 2

**Коэффициенты отражения образцов из конструкционных радиопоглощающих материалов (КРПМ)**

Длина волны, см		2	3	4	5	6	7,5	10	12
Коэффициент отражения, дБ	Общая толщина 12,5 мм	-14,2	-12	-13,5	-13,3	-13	-12,8	-12	-10,2
	Общая толщина 11 м	-11,1	-11,2	-12,8	-12,8	-12,6	-13,4	-10	-7,3

Из данных табл. 1 и 2 видно, что монолитные КРПМ на основе стеклопластиков, наполненных науглероженным волокном, сохраняют прочностные характеристики стеклопластика и имеют коэффициент отражения не выше -10 дБ в диапазоне длин волн с максимальной длиной волны не менее десятикратной толщины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
3. Ворошевский А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств: Учебник. С.-Пб. 2005. С. 68–78.
4. Кириллов В.Ю. Расчет параметров импульсных электромагнитных помех (ЭМП) в ближней и дальней зонах /В сб. докл. 6-й НТК ЭМС ТС и БО (ЭМС-2000). СПб. 2000. С. 134–137.
5. Kirillov V.J. Savostianov V.V. The complex of technical means of space vehicle on board electronic device s with stability under influence of electrostatic compptabiliti. 1994. P. 41.
6. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: Пер. с англ. М. 1977. С. 3–352.
7. Каблов Е.Н. С расчетом на «умные» материалы //Индустрия. 2012. №26.
8. Фомин А.И., Ракитина В.Р., Кавун Н.С. Стеклопластики конструкционного назначения /В сб. Авиационные материалы: Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. Юбилейный сб. М.: МИСИС, ВИАМ. 2002. С. 291–300.
9. Кириллов В. В., Кавун Н.С., Деев И.С. и др. Исследование влияния тепло-влажностного воздействия на свойства эпоксидных стеклопластиков //Пластические массы. 2008. №9. С. 14–17.

10. Давыдова И.Ф., Каблов Е.Н., Кавун Н.С. Термостойкие негорючие полиимидные стеклотекстолиты для изделий авиационной и ракетной техники //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. №9. С. 2–11.
11. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Термостойкие герметичные стеклотекстолиты //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №11. С. 18–20.
12. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики в конструкциях авиационной и ракетной техники //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 36–42.
13. Акатенков Р.В., Аношкин И.В., Беляев А.А., Битт В.В., Богатов В.А., Дьячкова Т.П., Куцевич К.Е., Кондрашов С.В., Романов А.М., Широков В.В., Хоробров Н.В. Влияние структурной организации углеродных нанотрубок на радиозранирующие и электропроводящие свойства нанокомпозитов //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 35–42.
14. Акатенков Р.В., Кондрашов С.В., Фокин А.С., Мараховский П.С. Особенности формирования полимерных сеток при отверждении эпоксидных олигомеров с функционализированными нанотрубками //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 31–37.
15. Composite material structure able to absorb and dissipate incident electromagnetic radiation power: pat. 0742095 EP.
16. Structural composite material absorbing radar waves and use of such a material: pat. 6111534 US.
17. Конструкционный радиопоглощающий материал: пат. 20367069 Рос. Федерации.
18. Конструкционный радиопоглощающий материал: пат. 2456722 Рос. Федерации.
19. Розанов К.А. Фундаментальные ограничения для ширины рабочего диапазона радиопоглощающих покрытий //Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. №5. С. 526–530.
20. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем: Дис. к.т.н. М. 1947. 144 с.
21. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах //Известия АН СССР. 1957. С. 55–56.

#### REFERENS LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 g. [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 7–17.
2. Grashhenkov D.V., Chursova L.V. Strategija razvitija kompozicionnyh i funkcional'nyh materialov [Strategy of development of composite and functional materials] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 231–242.
3. Voroshevskij A.A., Gal'perin V.E. Jelektromagnitnaja sovmestimost' sudovyh tehnicheskikh sredstv [Electromagnetic compatibility of ship technical means]: Uchebnik. S.-Pb. 2005. S. 68–78.
4. Kirillov V.Ju. Raschet parametrov impul'snyh jelektromagnitnyh pomeh (JeMP) v blizhnej i dal'nej zonah [Calculation of parameters of pulse electromagnetic hindrances (EMH) in near and far zones] /V sb. dokl. 6-j NTK JeMS TS i BO (JeMS-2000). SPb. 2000. S. 134–137.
5. Kirillov V.J. Savostianov V.V. The complex of technical means of space vehicle on board electronic device s with stability under influence of electrostatic comppatibiliti. 1994. P. 41.
6. Jelektromagnitnaja sovmestimost' radiojelektronnyh sredstv i neprednamerennye pomehi [Electromagnetic compatibility of radio-electronic means and inadvertent hindrances]: Per. s angl. M. 1977. S. 3–352.
7. Kablov E.N. S raschetom na «umnye» materialy [Counting upon «clever» materials] //Industrija. 2012. №26.
8. Fomin A.I., Rakitina V.R., Kavun N.S. Stekloplastiki konstrukcionnogo naznachenija [Fibreglasses of constructional appointment] /V sb. Aviacionnye materialy: Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2002. Jubilejnyj sb. M.: MISIS, VIAM. 2002. S. 291–300.
9. Kirillov V. V., Kavun N.S., Deev I.S. i dr. Issledovanie vlijanija teplo-vlazhnostnogo vozdejstvija na svojstva jepoksidnyh stekloplastikov [Research of influence of warm and moist impact on properties of epoxy fibreglasses] //Plasticheskie massy. 2008. №9. S. 14–17.
10. Davydova I.F., Kablov E.N., Kavun N.S. Termostojkie negorjuchie poliimidnye steklotekstolity dlja izdelij aviacionnoj i raketnoj tehniky [Heat-resistant nonflammable poliimidny fibreglasses for products aviation and rocketry] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocchnik. 2009. №9.

S. 2–11.

11. Davydova I.F., Kavun N.S. Termostojkie germetichnye steklotekstolity [Heat-resistant tight fiberglasses] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2011. №11. S. 18–20.
12. Davydova I.F., Kavun N.S. Stekloplastiki v konstrukcijah aviacionnoj i raketnoj tehniki [Fibreglasses in designs aviation both rocketry] //Steklo i keramika. 2012. №4. S. 36–42.
13. Akatenkov R.V., Anoshkin I.V., Beljaev A.A., Bitt V.V., Bogatov V.A., D'jachkova T.P., Kucevich K.E., Kondrashov S.V., Romanov A.M., Shirokov V.V., Horobrov N.V. Vlijanie strukturnoj organizacii uglerodnyh nanotrubok na radiojekranirujushhie i jelektroprovodjashhie svojstva nanokompozitov [Influence of the structural organization of carbon nanotubes on radio shielding and electroconductive properties of nanocomposites] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №1. S. 35–42.
14. Akatenkov R.V., Kondrashov S.V., Fokin A.S., Marahovskij P.S. Osobennosti formirovanija polimernyh setok pri otverzhenii jepoksidnyh oligomerov s funkcionalizovannymi nanotrubkami [Features of formation of polymer network upon curing of epoxy oligomers with functionalized nanotubes] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 31–37.
15. Composite material structure able to absorb and dissipate incident electromagnetic radiation power: pat. 0742095 EP.
16. Structural composite material absorbing radar waves and use of such a material: pat. 6111534 US.
17. Konstrukcionnyj radiopogloshhajushhij material [Constructional radio absorbing material]: pat. 20367069 Ros. Federacii.
18. Konstrukcionnyj radiopogloshhajushhij material [Constructional radio absorbing material]: pat. 2456722 Ros. Federacii.
19. Rozanov K.A. Fundamental'nye ogranichenija dlja shiriny rabocheho diapazona radiopogloshhajushhijh pokrytij [Fundamental limitations to the width of the working range of radar absorbing coatings] //Radiotehnika i jelektronika. 1999. T. 44. №5. S. 526–530.
20. Odelevskij V.I. Raschet obobshhennoj provodimosti geterogennyh system [Calculation of the generalized conductivity of heterogeneous systems]: Dis. k.t.n. M. 1947. 144 s.
21. Brehovskih L.M. Volny v sloistyh sredah [Waves in layered environments] //Izvestija AN SSSR. 1957. S. 55–56.