



УДК 678.84

**КОНСТРУКЦИОННЫЙ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЙ  
МАТЕРИАЛ ТРЕХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ С  
СОГЛАСУЮЩИМ СЛОЕМ**

А.А. Беляев

А.С. Агафонова

Е.А. Антипова

Е.Д. Ботаногова

**Июль 2013**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,  
№7, 2013 г.

*А.А. Беляев, А.С. Агафонова, Е.А. Антипова, Е.Д. Ботаногова*

## **КОНСТРУКЦИОННЫЙ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ ТРЕХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ С СОГЛАСУЮЩИМ СЛОЕМ**

*Исследованы радиотехнические характеристики конструкционных радиопоглощающих материалов трехслойной конструкции с согласующим слоем на поверхности. Исследовано влияние внешней силовой оболочки на радиотехнические характеристики. Описан принцип согласования входного слоя материала с помощью согласующего слоя на основе микросферотекстолита. Приведены результаты расчетов радиотехнических характеристик и экспериментов, подтверждающих правильность расчетов. Приведены прочностные характеристики микросферотекстолита.*

**Ключевые слова:** *конструкционный радиопоглощающий материал, микросферотекстолит, силовые оболочки, согласующий слой, коэффициент отражения.*

*A.A. Beljaev, A.S. Agafonova, E.A. Antipova, E.D. Botanogova*

## **CONSTRUCTIONAL RADIO ABSORBING MATERIAL OF THREE-LAYER STRUCTURE WITH A MATCHING LAYER**

*Given article is devoted research of radio engineering characteristics of a three-layer design constructional radio absorbing materials with a matching layer on a surface. Influence of an external power layer on radio engineering characteristics is investigated. The principle of matching the of material input layer with the help согласующего a layer on a basis of glass sintactic material is described. Results of calculations of radio engineering characteristics and the experiments proving calculations are resulted. Are resulted power characteristics of glass sintactic material.*

**Key words:** *constructional radio absorbing material, glass sintactic material, power layers, a matching layer, reflection ratio.*

В соответствии со стратегическими направлениями развития материалов и технологии их переработки на ближайшие 20 лет [1] большое внимание в работах института будет уделено композиционным и функциональным материалам [2] и их применению в авиа- и ракетостроении. В последнее время наблюдается тенденция к замене металлических материалов узлов и панелей изделий на конструкционные композиционные диэлектрические материалы. Особую роль в качестве основы таких материалов играют стеклопластики. В работе [3] подчеркнута их преимущество по сравнению с новыми композиционными материалами (например, на углеродной основе) – возможность многофункциональности использования и регулировки физико-механических и диэлектрических характеристик в широких пределах. В работах [4–6] продемонстрирована их стойкость к эксплуатационным факторам.

Помимо высоких прочностных характеристик стеклопластики обладают (в отличие от углепластиков) хорошими изоляционными свойствами (удельное сопротивление составляет  $\sim 10^{16}$  Ом·м) и сравнительно невысокой диэлектрической проницаемостью (относительная диэлектрическая проницаемость стеклопластиков, как правило, не более 5). Это дает широкие возможности применения стеклопластиков в качестве основы конструкционных радиопрозрачных и конструкционных радиопоглощающих материалов (КРПМ) [7]. КРПМ необходимы для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры. Радиопоглощающие свойства обычно достигаются введением в стеклопластик высокоомного микропровода или углеродсодержащих наполнителей [8], в том числе углеродных наночастиц [9]. В КРПМ радиопоглощающие свойства обеспечивают вышеперечисленные наполнители практически без увеличения массы и искажения контура узлов изделия, при этом используется вся толщина материала, благодаря чему диапазон частот эффективного действия у КРПМ в несколько раз больше, чем у радиопоглощающих покрытий, толщина которых ограничена требованиями к весовым характеристикам.

На основании расчетов, проведенных в соответствии с работой [10], показано, что диапазон длин волн (частот) радиопоглощающих покрытий при толщине 1–2 мм составляет не более  $\pm 20\%$  от центральной длины волны (частоты). У КРПМ диапазон длин волн может перекрывать всю сантиметровую и часть дециметровой области. В случае изготовления из КРПМ нагруженных элементов изделий, его выполняют в виде монолитного стеклопластика, в связующее которого введены углеродсодержащие элементы, – например, науглероженное вискозное волокно. В случае изготовления из КРПМ деталей, испытывающих небольшие механические нагрузки (облицовочных

панелей, внутренних перегородок, материалов для полов безэховых камер), целесообразно применять КРПМ трехслойной структуры, состоящей из внешней и внутренней силовых оболочек на основе стеклопластика и облегченного заполнителя [11], – например, разреженного волокна или сотопласта, в соты которого введены легкие заполнители с примесью науглероженного волокна. При толщине такого облегченного КРПМ порядка нескольких сантиметров и средней плотности 500–600 кг/м<sup>3</sup>, материал эффективен в диапазоне сантиметровых и дециметровых длин волн.

У КРПМ на основе монолитного стеклопластика снижение коэффициента отражения ограничено величиной относительной диэлектрической проницаемости стеклопластика порядка 4–5, и в широком диапазоне длин волн коэффициент отражения не ниже значения

$$10 \cdot \lg \left( \frac{\sqrt{\epsilon_{ст}} - 1}{\sqrt{\epsilon_{ст}} + 1} \right)^2 \text{ дБ}, \quad (1)$$

которое находится в пределах (-8,5÷-10 дБ), где  $\epsilon_{ст}$  – относительная диэлектрическая проницаемость стеклопластика. У КРПМ на основе трехслойной структуры толщиной, равной половине максимальной длины волны диапазона, коэффициент отражения можно снизить до -15÷-19 дБ в широком диапазоне длин волн при условии, что толщина внешней силовой оболочки  $d$  и минимальная длина волны диапазона ( $\lambda_{min}$ ) удовлетворяют соотношению

$$\frac{d\sqrt{\epsilon_{ст}}}{\lambda_{min}} < 0,3. \quad (2)$$

При дальнейшем уменьшении длины волны коэффициент отражения будет расти и достигнет максимального значения ~(-4 дБ) при условии  $\frac{d\sqrt{\epsilon_{ст}}}{\lambda} = 0,25$ .

Исходя из требований к прочностным характеристикам внешняя силовая оболочка обычно не должна быть тоньше 0,5 мм, а по требованию к диапазону, в котором коэффициент отражения не должен быть выше -10 дБ, максимальная частота может достигать 40 ГГц (минимальная длина волны 7,5 мм). В диапазоне длин волн 15–7,5 мм (частота 20–40 ГГц) коэффициент отражения, обусловленный наличием внешней силовой оболочки толщиной 1,0 мм, может достигать -4 дБ, т. е. задача перекрытия диапазона частот 1–40 ГГц (длины волн 30–0,75 см) для КРПМ трехслойной конструкции сводится в основном к «просветлению» внешней силовой оболочки.

В данной работе рассматривается КРПМ трехслойной конструкции с внутренней силовой оболочкой толщиной 2 мм и внешней силовой оболочкой толщиной 0,5 мм.

Оболочки выполнены из стеклопластика на основе стеклоткани Т-10-80 и связующего ЭДТ-69Н. Облегченный наполнитель толщиной 100 мм выполнен на основе стеклосотопласта ССП-1-8Т с размером ячейки 8 мм. Ячейки стеклосотопласта заполнены связующим ЭДТ-69Н, смешанным со стеклянными микросферами МС-А9 (группа Б2). Плотность заполняющей ячейки смеси составляет 280–320 кг/м<sup>3</sup>, относительная диэлектрическая проницаемость: 1,5–1,6. В смесь связующего с микросферами введено небольшое количество (до 1% по объему) науглероженного волокна типа «Углен». По толщине наполнитель разбит на четыре слоя, отличающиеся между собой концентрацией науглероженного волокна (содержание волокна оптимизировано).

С помощью расчетных методов проведено исследование влияния внешней силовой оболочки на радиотехнические характеристики КРПМ и исследование возможности компенсации отражений, вносимых внешней силовой оболочкой, с помощью согласующего слоя, расположенного на входе КРПМ. В диапазоне длин волн, удовлетворяющих условию (2), т. е. при длинах волн  $>3$  см (частотах  $<10$  ГГц) достижим коэффициент отражения порядка  $-17\div-19$  дБ. При частотах  $>10$  ГГц коэффициент отражения будет возрастать. Возрастание происходит из-за скачков диэлектрической проницаемости на двух поверхностях раздела: внешней силовой оболочки с легким наполнителем и внешней силовой оболочки с наружным пространством. При выполнении условия (2), напряженности полей отраженных волн, возникающих на двух поверхностях раздела, складываются с разностью фаз, близкой к 180 град, и гасят друг друга. При несоблюдении условия (2) разность фаз волн, отраженных двумя поверхностями, приближается к 360 град, и напряженности полей отраженных волн складываются. Изнутри структуры КРПМ этот скачок диэлектрической проницаемости можно уменьшить путем повышения диэлектрической проницаемости наполнителя трехслойной структуры на участке, граничащем с внешней силовой оболочкой. Это достигается повышением содержания науглероженного волокна в наполнителе вблизи границы с внешней силовой оболочкой. При этом произойдет некоторое увеличение коэффициента отражения в низкочастотной области диапазона. Снаружи скачок диэлектрической проницаемости сглаживается с помощью согласующего слоя, расположенного на внешней поверхности, имеющего диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_{с.с} \approx \sqrt{\epsilon_{ст}} \approx 2,0-2,2$  и толщину порядка четверти длины волны в материале этого слоя на самой высокой частоте (в данном случае толщина  $\sim 1,5$  мм).

Этот слой выполняется из микросферотекстолита на основе стеклопластика, в связующее которого введено от 40 до 70% стеклянных полых микросфер.

Диэлектрическую проницаемость согласующего слоя можно регулировать содержанием микросфер в связующем микросферотекстолита и соотношением суммарной толщины слоев стеклоткани и слоев смеси связующего с микросферами. В работах [12, 13] показано, что, хотя предел прочности при сжатии у микросферотекстолита в 4–5 раз меньше, чем у монолитного стеклопластика, его величина достаточна, чтобы обеспечить прочность, требуемую для ненагруженных деталей.

В табл. 1 приведены результаты экспериментального исследования диэлектрической проницаемости смеси связующего и микросфер при различном объемном содержании микросфер на частоте 9,43 ГГц в волноводной линии P1-28.

Таблица 1

**Диэлектрическая проницаемость смеси связующего с микросферами**

Объемное содержание микросфер, %	70	50	40
Относительная диэлектрическая проницаемость	1,78	1,95	2,40

В табл. 2 приведены электродинамические и прочностные характеристики микросферотекстолита, в связующее которого на основе смолы ЭД-22 с отвердителем ПО-300 введено 50% стеклянных микросфер МС-А9 (группа Б2). В качестве армирующего материала использовали два наружных слоя стеклоткани Т-10-80, толщина пакета 2,3 мм.

Таблица 2

**Электродинамические и прочностные характеристики\* микросферотекстолита**

Относительная диэлектрическая проницаемость	Предел прочности, МПа		
	при растяжении	при изгибе	при сжатии
<u>1,95–2,05</u>	<u>74–84</u>	<u>227–245</u>	<u>86–89</u>
2,00	77	232	87

\* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

В табл. 3 приведены рассчитанные достижимые коэффициенты отражения структуры КРПМ без внешней оболочки, с внешней силовой оболочкой толщиной 0,5 мм и с внешней силовой оболочкой, согласованной изнутри и снаружи. Расчеты проводили с использованием формул, приведенных в работах [5, 6].

Коэффициенты отражения КРПМ трехслойной структуры

Частота, ГГц	Значения коэффициента отражения			
	при расчете без внешней силовой оболочки	при расчете с наличием внешней силовой оболочки толщиной 0,5 мм	при расчете	по результатам измерений
			с наличием внешней силовой оболочки толщиной 0,5 мм и согласующего слоя	
1,0	-24,99	-20,03	-12,52	-10,10
1,5	-19,97	-22,42	-12,00	-11,6
2,0	-15,36	-13,61	-10,29	-10,3
2,5	-19,54	-17,37	-12,15	-10,6
3,0	-16,60	-14,10	-11,10	-12,7
4,0	-15,22	–	-15,75	-14,4
6,0	-20,15	-15,95	-12,85	-12,4
8,0	-16,52	-17,08	-12,29	-10,8
10,0	-22,83	-14,66	-13,54	-15,5
15,0	-17,90	-12,36	-12,31	-12,0
20,0	-18,00	-10,95	-11,54	-11,2
25,0	-20,43	-9,06	-11,05	-10,4
30,0	-21,13	-7,64	-11,15	-12,3
40,0	-18,60	-6,29	-12,37	-13,5

Видно, что внешняя силовая оболочка значительно ухудшает радиотехнические характеристики КРПМ в верхней части частотного диапазона. Применение согласующего слоя улучшает радиотехнические характеристики в верхней части частотного диапазона. При этом ухудшаются характеристики в низкочастотной области, но остаются в обычно необходимых пределах – не выше -10 дБ, что, как правило, достаточно для обеспечения электромагнитной совместимости. Проведенная экспериментальная оценка коэффициентов отражения изготовленного образца КРПМ с помощью анализатора цепей типа Agilent N5230C и антенн П6-23 и П6-69 подтвердили правильность расчетов.

*Авторы выражают благодарность к.т.н. А.М. Романову за помощь и консультации при написании данной статьи.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
3. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики – многофункциональные композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 253–260.
4. Кириллов В.В., Кавун Н.С., Деев И.С. и др. Исследование влияния тепловлажностного воздействия на свойства эпоксидных стеклопластиков //Пластические массы. 2008. №9. С. 14–17.
5. 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.
6. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Термостойкие герметичные стеклотекстолиты //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №11. С. 18–20.
7. Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М. Радиопоглощающие материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 348–352.
8. Агафонова А.С., Беляев 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. (в печати).
9. Po Chul Kim, Dai Gil Lee Composite sandwich constructions for absorbing the electromagnetic waves //Composite Structures. 2009. №87. P. 161–167.
10. Розанов К.А. Фундаментальные ограничения для ширины рабочего диапазона радиопоглощающих покрытий //Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. №5. С. 526–530.
11. Кондрашов Э.К., Постнов В.И., Петухов и др. Исследование свойств трехслойных панелей на модифицированном связующем ФПР-520Г //Авиационные материалы и технологии. 2009. №3. С. 19–23.
12. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики в конструкциях авиационной и ракетной техники //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 36–42.

13. Долматовский М.Г., Соколов И.И. Особенности разрушения сотовых панелей со сферопластиками //Авиационные материалы и технологии. 2008. №4. С. 19–25.