

УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-30-33

А.С. Агафонова, С.В. Кондрашов

### ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНОЛИТНОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ (МСРТ)

Дано описание особенностей технологии изготовления стеклопластиков радиотехнического назначения монолитной структуры. Приведены результаты исследований физико-химических и упруго-прочностных свойств связующего, используемого для изготовления монолитного стеклопластика радиотехнического назначения, упруго-прочностных свойств волокон стеклотканей, а также результаты исследования прочностных характеристик стеклопластиков и результаты экспериментальной проверки радиотехнических характеристик на образцах материала в широком диапазоне частот.

**Ключевые слова:** эпоксидное связующее, науглероженное волокно, стеклопластик.

Features of a technology to manufacture glass-fiber plastics with monolithic structure intended for radio engineering are described. Results of researches of physical, chemical, elastic and strength properties of binding agent used for production of monolithic glass-fiber plastic for radio engineering, elastic and strength properties of fibers of glass fabrics and also results of researches of strength characteristics of glass-fiber plastics and results of experimental verification of radio engineering characteristics of material samples within a wide range of frequencies are given.

**Key words:** epoxy binding agent, carburized fiber, glass-fiber plastic.

В современных самолетах и вертолетах имеется большое количество блоков радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в том числе для связи, навигации и обеспечения посадки в условиях плохой видимости. От надежности работы этой аппаратуры во многом зависит безопасность полетов. Взаимодействие этих блоков, в том числе через антенные системы, размещенные на борту, вызывает помехи в работе этих блоков и снижает надежность их работы. Нарушение нормальной работы блоков может вызвать также несанкционированное электромагнитное излучение. Поэтому в целях безопасности полетов необходимо обеспечить электромагнитную совместимость (ЭМС) бортового радиоэлектронного оборудования и его защиту от несанкционированного воздействия электромагнитного излучения [1–5].

Одной из эффективных мер обеспечения ЭМС на транспортных средствах, в том числе на летательных аппаратах (ЛА), является применение на их внешних и внутренних элементах радиопоглощающих материалов (РПМ) [6]. В настоящее время существует множество радиопоглощающих материалов как в виде покрытий, так и в виде конструктивных радиопоглощающих материалов [7]. При применении радиопоглощающих материалов в виде покрытий увеличивается масса изделия, что приводит к ограничению толщины и диапазона частот эффективного действия. В работе [8] авторы описали конструктивный радиопоглощающий материал, состоящий из слоев стеклоткани, пропитанных полиэфирным связующим. Поглощающие слои содержат наполнитель в виде электропроводящего технического углерода и располагаются между диэлектрическими слоями на основе стеклоткани. Данная структура матери-

ала способна обеспечивать уровень ослабления ЭМИ до 55 дБ в частотных диапазонах в пределах от 9,65 до 10,78 ГГц и обладает механической прочностью (предел прочности при растяжении 54 МПа, модуль упругости при растяжении 4,1 ГПа). В работе [9] описан конструктивный радиопоглощающий материал, состоящий из внутреннего слоя, несущего внешние силовые нагрузки и являющегося отражателем электромагнитных волн, и внешнего радиопоглощающего слоя. Внутренний слой представляет собой трехслойную структуру, состоящую из двух наружных оболочек на основе углепластика и расположенного между ними заполнителя на основе вспененного поливинилхлорида. Внешний слой представляет собой наноструктурированный композит на основе стеклопластика. В качестве поглощающего наполнителя в него вводят углеродные нанотрубки. Внутренний и внешний слои соединяют между собой с помощью эпоксидного связующего. Данный материал позволяет обеспечивать уровень ослабления ЭМИ более чем на 10 дБ в частотном диапазоне от 8,2 до 11,5 ГГц. Недостатком описанных радиопоглощающих материалов является низкая механическая прочность, что затрудняет их использование в составе конструкций, несущих силовую нагрузку.

Таким образом, разработка радиопоглощающих материалов с новым уровнем прочностных свойств является актуальной. В данной работе рассматривается технология изготовления конструктивного радиопоглощающего материала, представляющего собой монолитный стеклопластик радиотехнического назначения (МСРТ). Особенность технологии изготовления МСРТ заключается в том, что формовочный пакет составляет-

ся из калиброванных по радиотехническим характеристикам (РТХ) препрегов (калибровка проводилась по фазе и амплитуде коэффициента прохождения при частоте 10 ГГц). Препреги формовочного пакета разделены на несколько групп с одинаковыми РТХ внутри каждой группы и отличаются друг от друга при переходе от одной группы к другой. Перед выкладкой производится контроль РТХ препрегов и их отбраковка, что значительно сокращает брак отпрессованных деталей. Все слои стеклопластика обеспечивают одновременно поглощение электромагнитных волн и высокие прочностные характеристики.

В качестве наполнителя, обеспечивающего поглощение электромагнитных волн, использовали науглероженное волокно (Углен-9 и Углен-ЦШЭ) при соотношении длины этого волокна к диаметру в пределах порядка сотен. Проведенное математическое моделирование показало, что возможно также применение волокна УКН-5000, но его длина должна быть >10 мм, что затрудняет введение этих волокон в стеклопластик. Однако волокно УКН-5000 более прочное и лучше сохраняет свою форму при введении в стеклопластик. В целом же применение волокна Углен-ЦШЭ предпочтительнее остальных. Для эффективного действия конструктивного радиопоглощающего полимерного материала объемное содержание волокна должно быть не более 0,2–0,5%. При таком малом содержании наполнителя стеклопластик сохраняет высокие прочностные характеристики. В качестве наполнителя, обеспечивающего поглощение электромагнитной энергии, можно также использовать материалы с магнитными потерями, но их приходится вводить в диэлектрическую матрицу (связующее) в количестве не менее 30–40% (объемн.), при этом масса наполнителя в несколько раз превышает массу матрицы. Введение такого количества наполнителя приводит к значительному уменьшению прочности стеклопластика и увеличению его массы, что нежелательно для летательных аппаратов. Для эффективного поглощения электромагнитной энергии сажу или графит необходимо вводить в стеклопластик в количестве не менее 20–30% (объемн.). Введение такого количества наполнителя приведет к ослаблению прочностных характеристик стеклопластика.

Технологический процесс изготовления препрегов, калиброванных по РТХ, состоит из следующих этапов:

– введение углеродсодержащего наполнителя в расплав компонента связующего;

– приготовление раствора связующего с наполнителем;

– пропитка стеклоткани (получение препрега);

– контроль пропитанной стеклоткани и ее хранение;

– сборка и формование слоев пропитанной стеклоткани (препрега) в многослойную структуру;

– контроль радиотехнических характеристик многослойной структуры препрегов.

Известно, что существенное влияние на диэлектрические и прочностные характеристики стеклопластиков оказывает тип ткани и связующего, на основе которых они изготовлены [10–14]. Сравнительный анализ прочностных характеристик стекловолокон, выпускаемых в настоящее время для стеклотканей, показал, что наилучшими характеристиками по пределу прочности при разрыве и по величине модуля упругости обладают ткани Т-60 и Т-64. В табл. 1 приведены сравнительные данные по прочностным характеристикам стекловолокон типа Е, на основе которого изготавливают стеклоткань Т-10, и стекловолокон типа ВМП, на основе которого изготавливают стеклоткани Т-60 (ТУ 6-48-05786904-111-92) и Т-64 (ТУ 5952-009-16319666-98).

Для изготовления конструктивных материалов лучше всего использовать связующие на основе эпоксидных смол по следующим причинам:

– связующие обладают хорошей адгезией к наполнителям и армирующим тканям;

– усадочные явления при отверждении связующих ниже, чем для связующих на основе фенольных или полиэфирных смол;

– конструктивные материалы на основе данных связующих обладают высокими механическими свойствами [15–20].

При изготовлении препрегов методом налива отдельные слои стеклоткани пропитывались связующим-расплавом с небольшими добавками (<1% объемн.) науглероженного волокна. С точки зрения возможности введения углеродсодержащего волокна и лучшего его распределения по объему связующего в ходе исследований было выбрано эпоксидное связующее-расплав ВСЭ-1212, представляющее собой смесь эпоксидных смол и 4,4'-диаминодифенилсульфона в качестве отвердителя и характеризующееся определенными реологическими свойствами (кажущаяся вязкость при температуре 100°C составляет 15 Па·с), с рабочей температурой 120°C. Науглероженное волокно вводили в один из компонентов связующего ВСЭ-1212 и нагревали в термошкафу до темпе-

Сравнительные характеристики стекловолокон разных типов

Показатель	Значения показателя для стекловолокон типа	
	Е	ВМП
Предел прочности при разрыве (по основе), МПа	3500	4500–5000
Модуль упругости (по основе), ГПа	70	95

Таблица 2

## Сравнительные результаты прочностных испытаний образцов из монолитного стеклопластика радиотехнического назначения с наполнителем и без волокна «Углен»

Показатель	Значение показателя для образцов			
	1	2	3	4 (без волокна)
Предел прочности при изгибе, МПа	500	475	460	470
Предел прочности при сжатии, МПа	470	475	460	450
Предел прочности при растяжении, МПа	240	300	265	250

Таблица 3

## Измеренные коэффициенты отражения и прохождения для образцов из монолитного стеклопластика в диапазоне частот 15–2,5 ГГц

Характеристика	Условный номер образца	Значение характеристики при длине волны, см (при частоте, ГГц)							
		2,0 (15)	3,0 (10)	4,0 (7,5)	5,0 (6,0)	6,0 (5,0)	7,5 (4,0)	10,0 (3,0)	12,0 (2,5)
Коэффициент отражения, дБ	1	-14,2	-12,0	-13,5	-13,3	-13,0	-12,8	-12,0	-10,2
	2	-11,1	-11,2	-12,8	-12,8	-12,6	-13,4	-10,0	-7,3
	3	-10,9	-11,0	-12,6	-12,5	-12,3	-13,5	-10,1	-6,9
Коэффициент поглощения, дБ	1	-30,3	-29,1	-25,7	-22,4	-25,2	-26,4	-23,1	-21,7
	2	-25,4	-24,7	-24,1	-23,6	-22,1	-23,3	-23,1	-20,2
	3	-24,2	-25,4	-25,2	-24,1	-23,2	-21,7	-22,0	-20,4

ратуры 60°C в течение 1 ч для лучшего распределения волокна по объему связующего и во избежание процесса комкования.

Для реализации ступенчато-градиентной структуры из калиброванных препрегов структура разделена на несколько радиотехнических слоев. Каждый такой слой при сборке составляли из элементарных слоев – препрегов с одинаковым содержанием радиопоглощающего наполнителя. В случае МСРТ структура состоит из четырех радиотехнических слоев, в препрегах каждого из них содержание наполнителя одинаково и изменяется при переходе в другой радиотехнический слой в сторону увеличения содержания наполнителя (вглубь от входного слоя).

Результаты испытаний, проведенных в ВИАМ, на прочность при сжатии, растяжении и изгибе образцов монолитного стеклопластика радиотехнического назначения, выполненных из высоко-модульной стеклоткани и эпоксидного связующего, приведены в табл. 2.

Результаты измерений коэффициента отражения образцов монолитного стеклопластика (три панели размером 400×400 мм) в диапазоне частот 15–2,5 ГГц приведены в табл. 3.

Для испытаний в диапазоне частот 15–2,5 ГГц (длина волны 2–12 см) использованы образцы со следующими характеристиками:

Условный номер образца	Толщина образца, мм
1	11,4
2	10,1
3	10,1

Характеристики образцов монолитного стеклопластика, приведенные в табл. 2 и 3, достигаются при выполнении следующего режима отверждения образцов с помощью гидравлического пресса:

- подъем температуры до 120±5°C;
- подъем давления до 0,5–0,6 МПа;
- выдержка при этих температуре и давлении в течение 1 ч;
- подъем температуры до 150±5°C при давлении 0,5–0,6 МПа;
- выдержка при этих температуре и давлении – не менее 1 ч;
- подъем температуры до 170±5°C при давлении 0,5–0,6 МПа;
- выдержка при этих температуре и давлении – не менее 3 ч.

Таким образом, показано, что значения приведенных прочностных характеристик разработанного монолитного стеклопластика радиотехнического назначения не уступают значениям аналогичных характеристик для обычных монолитных стеклопластиков. Наряду с высокими прочностными характеристиками созданный МСРТ обладает коэффициентом отражения не выше -10 дБ в диапазоне длин волн с максимальной длиной волны не менее десятикратной толщины. Это позволяет успешно использовать их для изготовления отдельных элементов планера самолета и перегородок отсеков, для замены металлической обшивки, а также изделий, обладающих повышенной температурой эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. 7–17.
2. Гращенко Д.В., Щетанов Б.В., Тинякова Е.В., Щеглова Т.М. О возможности использования кварцевого волокна в качестве связующего при получении легковесного теплозащитного материала на основе волокон Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 8–14.
3. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов //Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.
4. Радиозащитный слоистый материал: пат. 2433916 Рос. Федерация; опубл. 23.03.2010.
5. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: Пер. с англ. М. 1977. 352 с.
6. Кириллов В.Ю. Расчет параметров импульсных электромагнитных помех (ЭМП) в ближней и дальней зонах /В сб. докладов 6-й НТК ЭМС ТС и БО (ЭМС-2000). СПб. 2000. С. 134–137.
7. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов //Вестник ВГТУ. 2012. Т. 8. №6. С. 70–76.
8. Woo Seok Chin, Dai Gil Lee Development of the composite RAS (radar absorbing structure) for the X-band frequency range //Composite Structures. 2007. V. 77. P. 457–465.
9. Po Chul Kim, Dai Gil Lee Composite sandwich constructions for absorbing the electromagnetic waves //Composite Structures. 2009. V. 87. P. 161–167.
10. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии. 2008. 822 с.
11. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии. СПб.: Профессия. 2011. 566 с.
12. Щетанов Б.В., Балинова Ю.А., Люлюкина Г.Ю., Соловьева Е.П. Структура и свойства непрерывных поликристаллических волокон α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 13–17.
13. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики в конструкциях авиационной и ракетной техники //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 36–42.
14. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики – многофункциональные композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 253–260.
15. Bakelite A.G. Resin systems for fibre composites. 2004. P. 56–57.
16. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. Конструкционные материалы. М.: Машиностроение. 1990. 684 с.
17. Чурсова Л.В., Ким М.А., Панина Н.Н., Швецов Е.П. Наномодифицированное эпоксидное связующее для строительной индустрии //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 40–47.
18. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 260–265.
19. Богатов В.А., Кондрашов С.В., Хохлов Ю.А. Многофункциональные оптические покрытия и материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 343–348.
20. Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М. Радиопоглощающие материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 348–352.