

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВОГО МОДИФИКАТОРА НА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

¹А.Г. Бакаев, ¹Д.А. Шпарло, ¹А.И. Покровский
²С.А. Поняев, ²А.И. Седов, ²А.И. Ляшков

¹Физико-технический институт НАН Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Санкт-Петербург, Российская Федерация

С целью оценки состава волокнистого композиционного материала и конструкции панелей из него исследовано влияние фуллеренового модификатора на радиопоглощающие характеристики материала. Приведены результаты измерений коэффициента поглощения панелей с модификатором и без. Проведена оценка возможности применения предложенных составов в конструкциях летательных аппаратов. Установлена закономерность увеличения коэффициента радиопоглощения предложенных составов панелей в области более высоких частот.

Ключевые слова: волокнистые композиционные материалы, фуллерены, модификация, радиопоглощение

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE FULLERENE MODIFIER ON THE RADIO ABSORBING PROPERTIES OF POLYMER FIBROUS COMPOSITE MATERIALS

¹A.G. Bakayeu, ¹D.A. Shparla, ¹A.I. Pokrovsky
²S.A. Poniaev, ²A.I. Sedov, ²A.I. Lyashkov

¹Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

²Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation

In order to assess the fibrous composite material, structure of its panels the influence of fullerene modifier on the radio absorbing properties of the material is investigated. The measured results of the absorption coefficient of the panels with and without modifier are

given. The possibility of applying suggested compositions in the structure of aircrafts is assessed. The pattern of increasing radio absorption coefficient of suggested compositions of panels in the field of higher frequencies is determined.

Keywords: fibrous composite materials, fullerenes, modification, radio absorption

E-mail: trofs94@mail.ru

Введение и постановка задачи

Композиционные материалы относятся к материалам нового поколения и находят широкое применение в авиационной и космической технике, в частности, для производства деталей и узлов беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и радиотехники.

Для некоторых видов БЛА обязательным требованием является незаметность при выполнении ряда задач. Зачастую придание малозаметной формы у БЛА снижает его лётные качества, а применение ферритовых резонансных поглотителей электромагнитного излучения может привести к увеличению массы, что крайне недопустимо для авиационной техники. Поэтому материалы, используемые при производстве деталей и узлов БЛА, должны обладать рядом специфических характеристик таких, как высокая радиопоглощающая способность в широком диапазоне частот при малой толщине, низкий удельный вес, высокие механические характеристики, устойчивость к температурным нагрузкам и другим климатическим факторам.

Традиционное применение защитного экрана на металлической поверхности летательного аппарата приводит к резкому увеличению массы. Но если заполнить пространство между экраном и металлической поверхностью диэлектриком, то это позволит уменьшить толщину защитного слоя в $\sqrt{\epsilon}$ раз [1].

Однако недостатком таких структур является существенная зависимость коэффициента отражения от угла падения. Это обусловлено тем, что при наклонном падении проходимый волновой путь увеличивается, вследствие чего изменяются фазовые соотношения, и взаимного гашения волн не происходит. Увеличение рабочей полосы может быть достигнуто при использовании многослойных конструкций с постепенным изменением характеристик слоёв. С увеличением количества слоёв можно получить более широкую рабочую полосу. Таким образом, в теории можно получить абсолютно любую поглощающую способность, однако на практике у величины поглощения есть предел, определяющийся допустимой толщиной покрытия.

Перспективы применения таких структур на летательных аппаратах связаны с использованием в их составе материалов с регулируемыми свойствами. Действительно, если бы импедансы слоёв могли изменяться таким образом, чтобы при попадании летательного аппарата в зону действия радиолокационной станции формировалась частотная характеристика с минимумом на нужной частоте и для нужного направления падения волны, то проблема маскировки летательных аппаратов была бы решена. Такие технические решения широко обсуждают в литературе, однако информации об их применении в конструкциях в настоящее время не имеется [1].

Массу БЛА можно существенно снизить за счёт использования трёхслойных панелей с наполнителем из пенопласта и обкладками из волокнистых композиционных материалов (ВКМ). Применение трёхслойных панелей в качестве обшивки крыла при толщине наполнителя 5...6 мм позволяет исключить из силового набора крыла все типовые нервюры и стрингеры [2]. Снизить радиозаметность БЛА возможно решить путём использования ВКМ в конструкции панелей. Таким образом актуальной является разработка варианта многофункционального ВКМ для панелей БЛА, об-

ладающего радиопоглощающими свойствами в широком диапазоне, которые могут быть обеспечены за счет использования ферритовых порошков и углеродных наноструктур.

Целью работы являлось исследование влияния модифицирования фуллереновой сажей композиционных материалов для элементов летательных аппаратов на характеристики поглощения электромагнитного поля.

Методика и результаты исследований

Как отмечалось ранее в работах [3,4,5], отличительной особенностью технологии получения ВКМ является реализация уникальных свойств наноразмерных структур – нанопорошков и нанотрубок, так как их применение позволяет достичь технически значимого эффекта при использовании микродоз углеродных наноматериалов, например, фуллереносодержащей сажи.

Образцы для определения величины ослабления электромагнитного поля представляли собой плоские панели размером 300×300 мм с сердцевинной из пенопласта ПС-1 и ПХВ-1, лицевой стеклопластиковой обкладкой на основе стеклоткани УТС производства ОАО «Полоцк-Стекловолокно» и тыльной обкладкой на основе углеродной пленки марки ЛО-22К/40 производства «ОАО «Химволокно» г. Светлогорск, Гомельская область. Пропитка обкладок проводилась связующим на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с полиэтиленполиамином и дибутилфталатом. Перед пропиткой тыльных обкладок на поверхность пенопласта наносили слой толщиной 100 мкм из композиции ЭД-20 с 60 % содержанием магнитомягкого ферритового порошка марки М2 000НМ1 с размером частиц 1–10 мкм. Дополнительно образец с пенопластом ПС-1 включает в себя фуллереносодержащую сажу в количестве 1,5 % по массе в связующем тыльной обкладки. Толщина образцов составила 4 мм (образец с сердцевинной ПС-1) и 8 мм (образец с сердцевинной ПХВ-1).

Диспергирование фуллереносодержащей сажи в связующее производилось на частоте 44 кГц с помощью ультразвуковой установки УЗДН-У4.2. Предварительное диспергирование фуллереносодержащей сажи осуществлялось в этаноле с последующим вводом в каждую составляющую эпоксидной композиции (ЭД-20, полиэтиленполиамин и дибутилфталат). После ввода раствора сажи в этаноле в составляющую композиции осуществлялась выдержка в сушильной камере при температуре 60 °С для удаления этанола. Перемешивание составляющих осуществляли вручную, после чего производили пропитку обкладок панелей с последующим затвердеванием в форме в вакуумном мешке под атмосферным давлением.

Размер и вид частиц фуллереносодержащей сажи марки ФСС, выпускаемой в России фирмой ООО «ФизТехПрибор» по ТУ 216 690-01-89 016 672-2011, показан на рис. 1. Во всем диапазоне размеров от нанометров до микрометров углеродный нанокластерный материал представляет собой фракталы с фрактальной размерностью 1,6 и корреляционным радиусом порядка 2 нм. Насыпная плотность углеродного нанокластерного материала 0,01 г/см³; его удельная поверхность 300–400 м²/г; коэффициент заполнения пор – 400 %. Содержание фуллеренов, легко экстрагируемых при помощи органических растворителей, например, толуола или о-ксилола, составляет около 10 массовых процентов. Отношение содержания фуллерена С60 к содержанию фуллерена С70 составляет от 2,5 до 3,5.

На рис. 2 показан внешний вид сечения образцов панелей (тыльная сторона снизу).

Экспериментальные работы по определению величины ослабления электромагнитного излучения проводили в производственно-исследовательском отделе

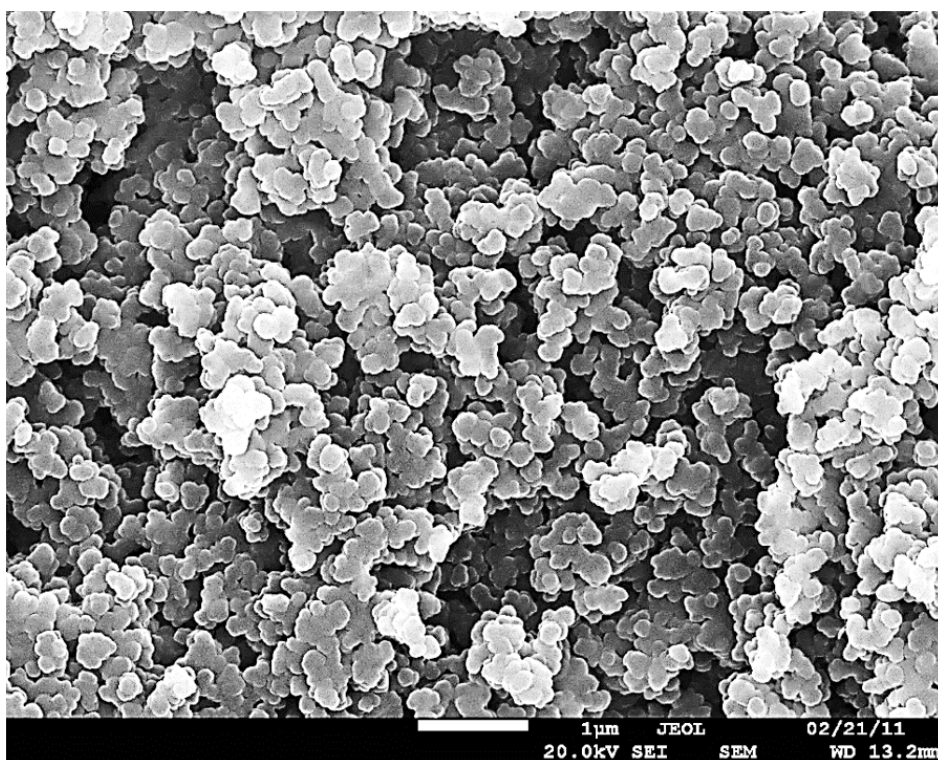


Рис. 1. Вид частиц фуллереносодержащей сажи

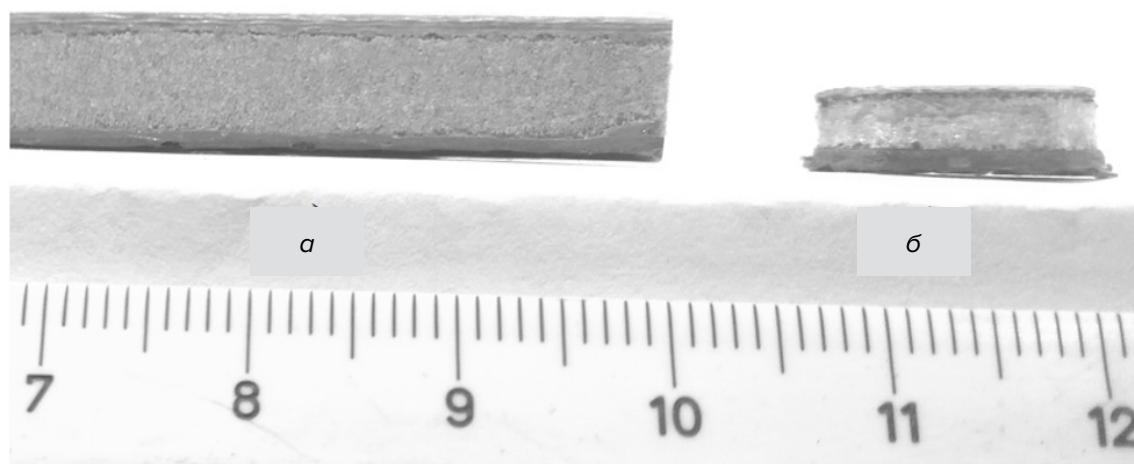


Рис. 2. Внешний вид сечения образцов панелей:
а – с сердцевиной из ПХВ-1; *б* – с сердцевиной из ПС-1

радиоэлектронных измерений РУП «БелГИМ» на установке национального эталона единицы плотности потока энергии с антенной ETS3115. Образец с фуллереносодержащей сажей и сердцевиной из пенопласта ПС-1 был испытан в диапазоне (0,9–15) ГГц, а образец не содержащий сажи в диапазоне (0,9–11,5) ГГц. Схема измерений изображена на рис. 3. Измерения проводились на фиксированной частоте. Исследуемым образцом 3 закрывали излучающую антенну 2, а затем измерялся уровень сигнала. Ослабление электромагнитного излучения определяли как разницу между уровнями сигналов приёмной и излучающей антенн в дБ.

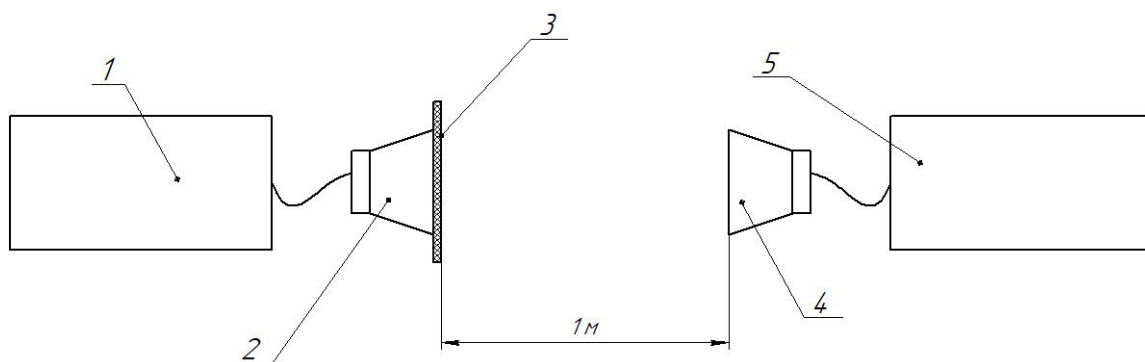


Рис. 3. Схема проведения измерений по поглощению электромагнитного излучения в диапазоне 0,9–15 ГГц:

1 – генератор СВЧ; 2 – излучатель; 3 – образец; 4 – приёмная антенна; 5 – анализатор

На рис. 4 представлены зависимости коэффициента поглощения электромагнитного поля от частоты излучения образцов с фуллереносодержащей сажей и без неё.

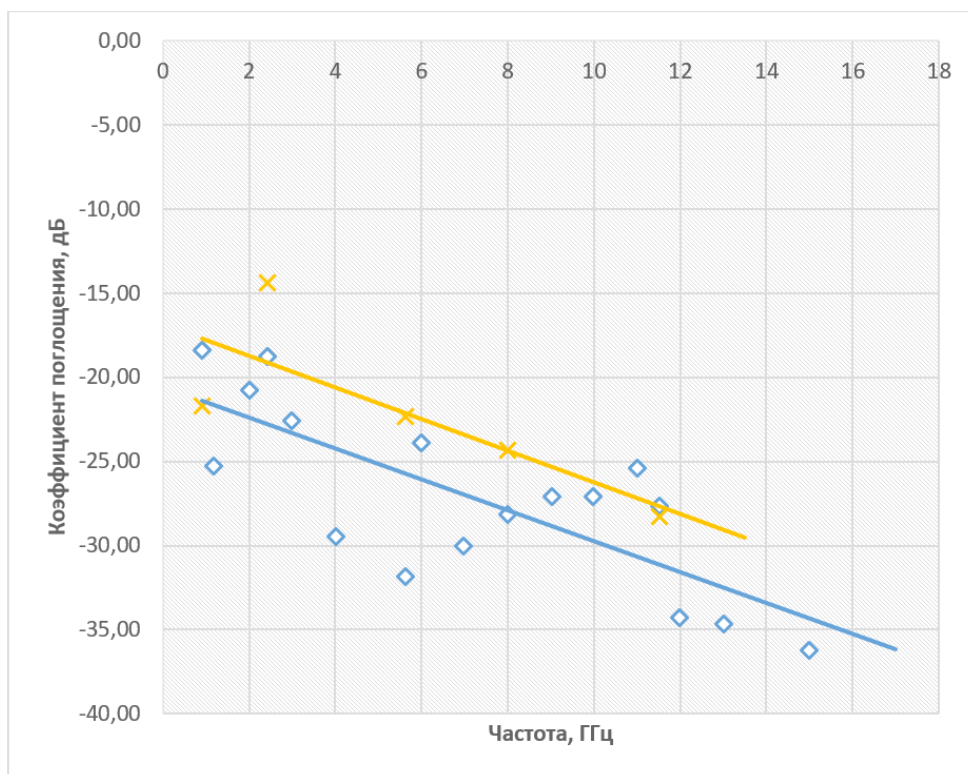


Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения электромагнитного излучения от его частоты:

◇ – образец с фуллереносодержащей сажей; × – образец без фуллереносодержащей сажи

Полученные зависимости показывают, что поглощение электромагнитного излучения исследуемыми образцами панелей происходит в широком диапазоне частот. Из сравнительного анализа поглощения электромагнитного поля видно, что введение в состав композиции фуллереносодержащей сажи обеспечивает уровень поглощения электромагнитной энергии на 5 дБ выше, чем у композиции без неё. У обоих образцов наблюдается рост поглощения электромагнитного излучения в область более высоких частот. Это можно объяснить наличием углеродного волокна в тыльных обкладках

панелей при совместном использовании ферритовых и углеродных порошков для модификации волокнистой композиции.

Заключение

Экспериментально установлена закономерность повышения коэффициента поглощения электромагнитного излучения при применении в составах многослойных волокнистых композиционных материалов фуллереносодержащей сажи совместно с ферритовым порошком.

Показано, что при введении в состав композиции фуллереносодержащей сажи в количестве 1,5 % по массе, в связующем тыльной обкладки коэффициент поглощения повышается на 5 дБ.

Разработанный композит рекомендован к применению в качестве радиопоглощающего материала в конструктивно-компоновочных решениях для снижения радиолокационной заметности летательного аппарата.

Авторы благодарят коллектив центра коллективного пользования (ЦКП) «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях», функционирующий на базе ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург за проведенные исследования образцов сажи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Львова, Л.А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов / Л.А. Львова. – Снежинск: Изд. РФЯЦ - ВНИИТФ, 2003. – 232 с.
2. Чумак, П.И. Расчёт, проектирование и постройка сверхлёгких самолётов / П.И. Чумак, В.Ф. Кривокрысенко. – М.: Патриот, 1991. – 238 с.
3. Монолитный стеклопластик радиотехнического назначения (МСРТ) / А.С. Агафонова [и др.] // «Композиционные материалы в промышленности» (Материалы 32 ежегодной международной конференции 4–8 июня 2012 г., Ялта). – С. 239–240.
4. Бакаев, А.Г. Влияние наноструктурированного углерода на радиопоглощение эпоксидного связующего / А.Г. Бакаев, А.И. Гордиенко, Р.Я. Синдаров // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. – С. 9–12.
5. Бычёнок, В.С. Материал для снижения радиолокационной заметности летательных аппаратов на основе углеродистых структур / В.С. Бычёнок, В.Н. Степаненко, Д.С. Быченко // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума (22–26 мая 2017 года, Витебск, Беларусь) в 2-х ч., ч.2 под ред. В.В. Рубаника – Витебск: Уо «ВГТУ», 2017. – С. 294–297.

REFERENCES

1. Lvova L.A. Radiolokacionnaya zametnost letatelnyx apparatov [Radar visibility of aircraft]. – Snezhinsk: Izd. RFYAC, VNIITF, 2003, 232p. (in Russian)
2. Chumak P.I., Krivokrysenko v.f. raschyot, proektirovanie i postrojka sverxlyogkix samolyotov [Calculation, design and construction of ultra-light aircraft]. Moscow, patriot, 1991, 238p. (in Russian)
3. Agafonova A.S., Antipova E.A., Belyaev A.A., Romanov A.M. Mololitnyj stekloplastik radiotexnicheskogo naznacheniya (msrt) [Monolithic fiberglass for radio engineering purposes (MFG)] / “Kompozicionnye materialy v promyshlennosti” (Materialy 32 ezhegodnoj mezhdunarodnoj konferencii 4–8 iyunya 2012 g., Yalta). pp. 239–240. (in Russian)
4. Bakaev A.G., Gordienko A.I., Sindarov R.Ya. Vliyanie nanostrukturirovannogo ugleroda na radiopogloshhenie epoksidnogo svyazuyushhego [Effect of nanostructured carbon on radio absorption of epoxy binder] / Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sb. nauchnyx trudov. v 3 kn. kn. 1. Materialovedenie / redkollegiya: S.A. Astapchik (gl. red.) [i dr.]. Minsk: FTI NAN Belarusi, 2015, pp. 9–12. (in Russian)
5. Bychyonok B.S., Stepanenko V.N., Bychenok D.S. Material dlya snizheniya radiolokacionnoj zametnosti letatelnyx apparatov na osnove uglerodistyx struktur [Material for reducing the radar visibility of aircraft based on carbon structures] / Perspektivnye materialy i tehnologi: materialy mezhdunarodnogo simpoziuma (22–26 maya 2017 goda, Vitebsk, Belarus) v 2-x ch., ch.2 pod red. V.V. Rubanika, Vitebsk: Uo “VGTU”, 2017, pp. 294–297 (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 13.06.18