

**МАТЕРИАЛ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЗАМЕТНОСТИ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ СТРУКТУР**

¹Быченко В.С., ¹Степаненко В.Н., ²Быченко Д.С.

¹УО «Белорусская государственная академия авиации»,
г. Минск, Беларусь, E-mail: uladzimirbychanok@gmail.com

НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ, г. Минск, Беларусь

Введение

В настоящее время радиолокационные станции (РЛС) являются основными средствами обнаружения и слежения за летательными аппаратами (ЛА). Отраженный от поверхности ЛА сигнал излучателя РЛС возвращается к приемнику, предоставляя информацию о месторасположении ЛА и его размерах. Поэтому для возможности сокрытия объекта, уменьшения эффективной дальности обнаружения, искажения его истинных размеров естественно стремление получить материал, способный поглотить излучение РЛС. Кроме того, актуальна и проблема поглощения СВЧ-излучения РЛС для защиты вблизи излучателя, а также для создания безэховых камер.

Применение технологий снижения радиолокационной заметности современных летательных аппаратов (т.н. технология «Стелс») в настоящий момент находит широкое распространение во всем мире. Сущность технологии заключается в максимальном снижении эффективной площади рассеивания (ЭПР) скрываемого объекта. ЭПР – площадь некоторой фиктивной плоской поверхности, расположенной нормально к направлению падающей плоской волны и являющейся идеальным и изотропным переизлучателем, которая, будучи помещена в точку расположения цели, создаёт в месте расположения антенны радиолокационной станции ту же плотность потока мощности, что и реальная цель. Добиваются этого как применением специальных форм ЛА (например отказом от применения прямых углов между элементами конструкции планера), так и использованием радиопоглощающих материалов, покрывающих поверхность ЛА. Современные ЛА с применением снижения ЭПР в США – это самолеты В-2, F-22, F-35 и ряд БПЛА, в Российской Федерации – Т-50, ПАК ДА.

Исследованиям электромагнитных свойств композиционных материалов на основе различных форм углерода посвящено большое количество работ [1–7]. Установленные в [1,6] особенности взаимодействия электромагнитного излучения с наноуглеродными композитами показывают перспективность использования данных материалов для широкого круга научно-практических применений.

Для решения ряда практических задач, например при расчетах компонентов фюзеляжа летательных аппаратов, важно знать, как параметры конструкционного материала влияют на его поглощательные свойства в СВЧ диапазоне. Поглощение СВЧ излучения может осуществляться за счет омических потерь, ферромагнитного резонанса в магнитных материалах, дипольной релаксации.

Изготовление композитов с электропроводящими углеродными включениями

В настоящей работе мы остановимся на исследовании поглощательных свойств немагнитных композиционных материалов с электропроводящими углеродными включениями в диапазоне частот 26.37 GHz. Данный частотный диапазон используется для связи со спутниками, в бортовой электронике, а также для определения скорости движущихся объектов. Как известно, малые концентрации углеродных включений в композитах позволяют изменять значения диэлектрической проницаемости полимерной пластины и получать материалы с контролируемым поглощением. Увеличить коэффициент поглощения в композитах можно за счет использования антиотражающих свойств гофрированных поверхностей.

В качестве наполнителя для композитов был выбран углеродный флок (УФ), приготовленный из углеродной нити УРАЛ-Н-100. Средний диаметр используемых углеродных волокон (УВ) составлял 5 мкм, длина волокон – 1 мм (СЭМ-изображение представлены на рис.1,а).

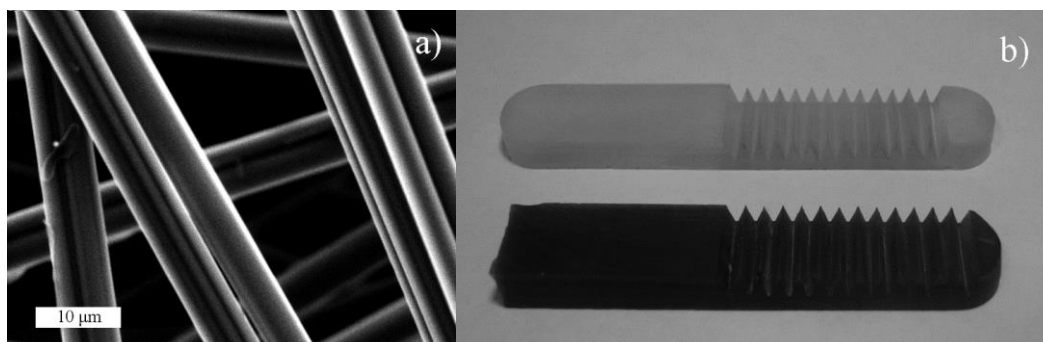


Рисунок 1 – (а) СЭМ-изображение углеродных волокон, входящих в состав углеродной нити УРАЛ-Н-100, (б) общий вид гофрированных композитов

Композиты на основе эпоксидной смолы марки ЭД-20, содержащие 0.2 % (по массе) УФ приготавливались по следующей методике: 11.8 мг УФ диспергировались в 10 мл этанола в ультразвуковой ванне в течение 8 минут. Затем в полученную суспензию добавлялось 5 г эпоксидной смолы ЭД-20. Полученная смесь подвергалась обработке ультразвуком в течение 8 минут, после чего помещалась в печь при температуре 80°C на 3 часа для удаления спирта. После испарения этанола смесь снова подвергалась обработке ультразвуком в течение 8 минут. Затем к смеси смолы и УФ добавлялось 0.55 г отвердителя ПЭПА. После ручного перемешивания в течение 5 минут композит заливался в формы. Затвердевание образцов происходило в течение 16 часов при комнатной температуре, после чего композиты помещались на 3 часа в печь при 80°C для окончательной полимеризации.

После окончательной полимеризации образцы композитов извлекались из форм, шлифовались до толщины $h=4.50$ мм и подвергались плоскопараллельному фрезерованию конической фрезой на станке с ЧПУ. Угол раствора конической фрезы составлял 45° , глубина фрезерования $dh=2.5$ мм. Масса фрезерованной части композита уменьшалась на 28%. Общий вид полученных композитов представлен на рисунке 1(б).

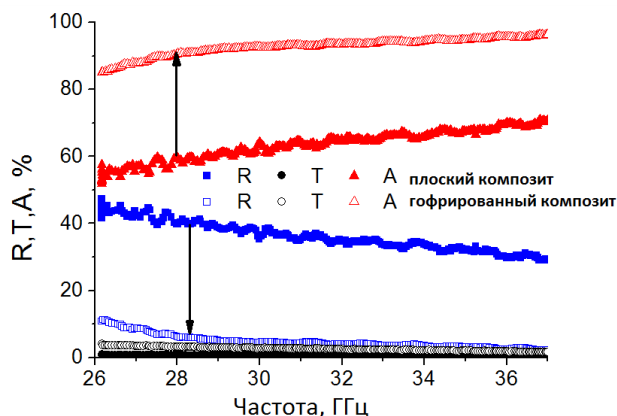


Рисунок 2 – Электромагнитный отклик плоскопараллельных и гофрированных композитов толщиной 4.50 мм, содержащих 0.2% (по массе) УФ

Электромагнитный отклик полученных материалов измерялся с помощью скалярного анализатора цепей ELMIKA R2-408R. Образцы композитов вырезались точно под размеры 7.2x3.4x4.5 мм и помещались в волновод для измерений модулей S-параметров (S_{21} , S_{11} – отношения амплитуд прошедшей и отраженной волн к амплитуде падающей волны, соответственно). Гофрированные композиты вырезались так, чтобы направление фрезерования было параллельно большей стороне волновода. Образцы помещались в волновод гофрированной стороной к падающему излучению. На рисунке 2 представлен электромагнитный отклик плоскопараллельных и гофрированных композитов одинаковой толщиной 4.50 мм, содержащих 0.2% (по массе) УФ. В случае, когда излучение падало на плоскую поверхность фрезерованного

композита, электромагнитный отклик был практически таким же, как у плоскопараллельного образца[8].

Из рисунка 2 видно, что гофрирование поверхности позволяет существенно увеличить коэффициент поглощения композита (с 63 до 92 % на частоте 30 ГГц) при той же общей толщине 4.50 мм.

Сравнительный анализ поглощения СВЧ-излучения в гофрированных композитах с углеродными волокнами и в промышленных поглотителях

Сравним исследуемый поглотитель на основе углеродных волокон с промышленным поглотителем, используемым в МРЛС «Контур-10 Ц» «РОЗ-1» ТУ-6-05-5008-73 «ХВ-3.2-А-2». Толщина поглотителя – 2мм, данный материал используется для покрытия внутренней ниши радара на самолете ТУ-134. Поглотитель представляет собой гибкий полимерный композиционный материал с магнитными включениями (вероятнее всего частицами карбонильного железа). В тыльную сторону поглотителя впрессована тонкая латунная сетка, которая играет роль заднего отражателя. Очевидно, что данный промышленный поглотитель на основе карбонильного железа рассчитывался для эффективной работы при более низких частотах, чем Ка-зона (26-37 ГГц). Поэтому для наблюдения интерференционного минимума отражения (и, соответственно, максимума поглощения) в Ка-зоне необходимо уменьшить штатную толщину 2 мм. На рисунке 3 представлены частотные зависимости S-параметров поглотителя при различных толщинах.

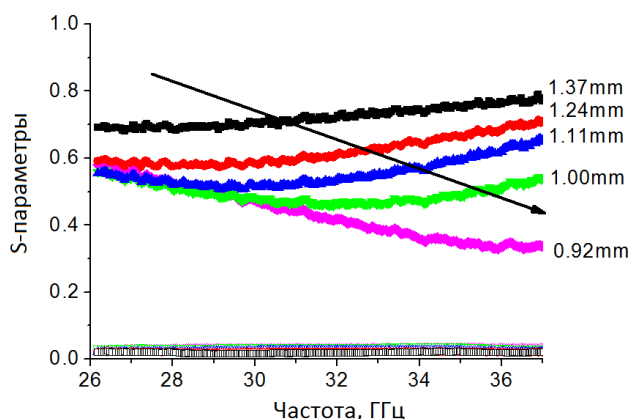


Рисунок 3 – S-параметры промышленного поглотителя различной толщины

Анализ рисунка 3 показывает, что уменьшение толщины приводит к монотонному смещению минимума отражение (максимума поглощения) в область более высоких частот. При этом максимальное поглощение около 90% достигается при минимальной толщине 0.92 мм поглотителя в районе 36 ГГц.

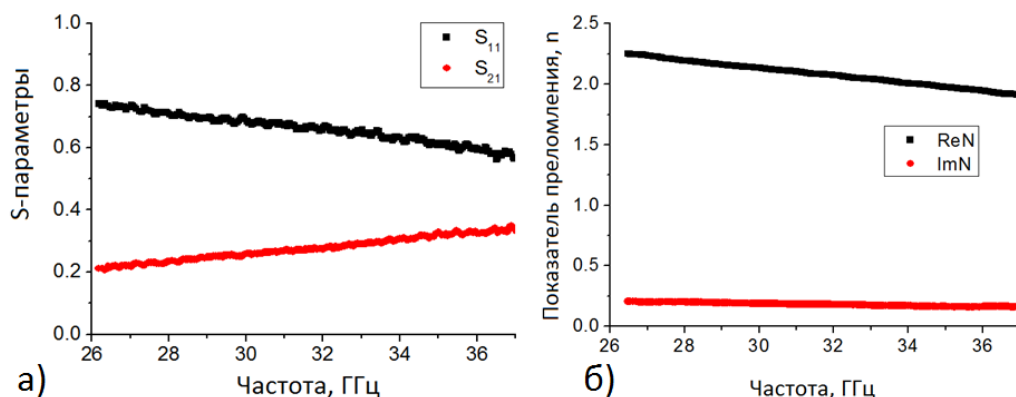


Рисунок 4 – а) S-параметры промышленного поглотителя толщиной 1.30мм без заднего отражателя, б) Частотная зависимость эффективного показателя преломления промышленного поглотителя, рассчитанная на основании экспериментальных данных на рисунке 2

Поскольку в поглотителе присутствовал задний отражатель, то амплитуда прошедшего сигнала для всех толщин на рисунке 3 оказалась практически равной нулю. Для получения информации о значениях показателя преломления исследуемого поглотителя из материала был удалена латунная сетка. Соответствующие S-параметры поглотителя без заднего отражателя представлены на рисунке 4,а.

Из рисунка 4,а хорошо видно, что удаление заднего отражателя приводит к существенному увеличению амплитуды прошедшего через материал сигнала. По данным значениям S-параметров был рассчитан комплексный коэффициент преломления материала, представленный на рисунке 4,б.

Зависимости на рисунке 4,б говорят о том, что материал обладает дисперсией, связанной с наличием у частиц карбонильного железа ферромагнитного резонанса в области более низких частот. Анализ данных на рисунке 4,а позволил установить, что промышленный поглотитель «ХВ-3.2-А-2» толщиной 2 мм спроектирован для работы на частоте около ~9.3 ГГц.

Таким образом, проведены исследования электромагнитных свойств промышленного поглотителя «ХВ-3.2-А-2», установлен механизм поглощения СВЧ-излучения в данном материале, определен принцип работы данного поглотителя, а также сделана оценка штатной рабочей частоты данного материала.

Подводя итог, можно заключить, что гофрированные композиты на основе углеродных волокон обладают рядом преимуществ перед классическим поглотителем, а именно:

– Смещение максимума поглощения на рисунке 3 говорит о невозможности создания широкополосного поглотителя на основе «ХВ-3.2-А-2». В свою очередь материал на основе углеродных волокон вполне пригоден для широкополосного поглощения СВЧ излучения.

– Наличие заднего отражателя в «ХВ-3.2-А-2» является принципиально важным, в то время как материал на основе углеродных волокон может использоваться без металлических компонент.

– Максимальный экспериментально наблюдаемый коэффициент поглощения промышленного поглотителя в Ka-зоне варьируется в диапазоне 64-90%, что существенно уступает гофрированным поглотителям на основе углеродных волокон.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы РФ «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», проект RFMEFI57715X0186.

Список литературы:

1. Qin F., Brosseau C. // J. Appl. Phys. 2012. Vol. 111. N 6. P. 061 301-24.
2. Kuzhir P., Paddubskaya A., Vychanok D. et al. // Thin Solid Films. 2011. Vol. 519, P. 4114–4118.
3. Sarto M.S., D'Aloia A.G., Tamburrano A. et al. // IEEE Electromagn. C. 2012. Vol. 54. N 1. P. 17–27.
4. Vychanok D., Plyushch A., Piasotski K. et al. // Phys. Scripta. 2015. Vol. 90. N 9. P. 094 019.
5. Быченко Д., Каныгин М., Окотруб А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 93. №. 10. С. 669–673.
6. Vychanok D.S., Shuba M.V., Kuzhir P.P. et al. // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 114. N 11. P. 114 304-7.
7. Vychanok D., Kuzhir P., Maksimenko S. et al. // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113. N 12. P. 124 103-6.
8. Vychanok, D., Plyushch, A., Gorokhov G. Et al. // Technical Physics 2016, Vol. 61, No. 12, P. 1880–1884.