

ных резин: науч. издание. М.: Машиностроение, 2008. 383 с.

6. Лынова А.С. Применение модифицированных статистических бутадиен-стирольных каучуков в протекторных резинах легковых шин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.17.06. Воронеж, 2020. 138 с.

7. Гришин Б.С. Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития. Казань: КГНИТУ, 2016. 420 с.

УДК 678.8

А.Г. Любимов, канд. техн. наук, доц.;

О.М. Касперович, канд. техн. наук, доц.;

А.Ф. Петрушеня, канд. техн. наук, доц.;

Л.А. Ленартович, канд. техн. наук, доц. (БГТУ, Минск);

Н.В. Любецкий, канд. техн. наук, вед. научн. сотр.;

Д.С. Быченко, канд. физ-мат. наук., зав. лаб.

(НИИ Ядерных проблем БГУ, Минск);

R.P. Kuzhir, prof.

(University of eastern Finland of Institute of Photonics, Finland)

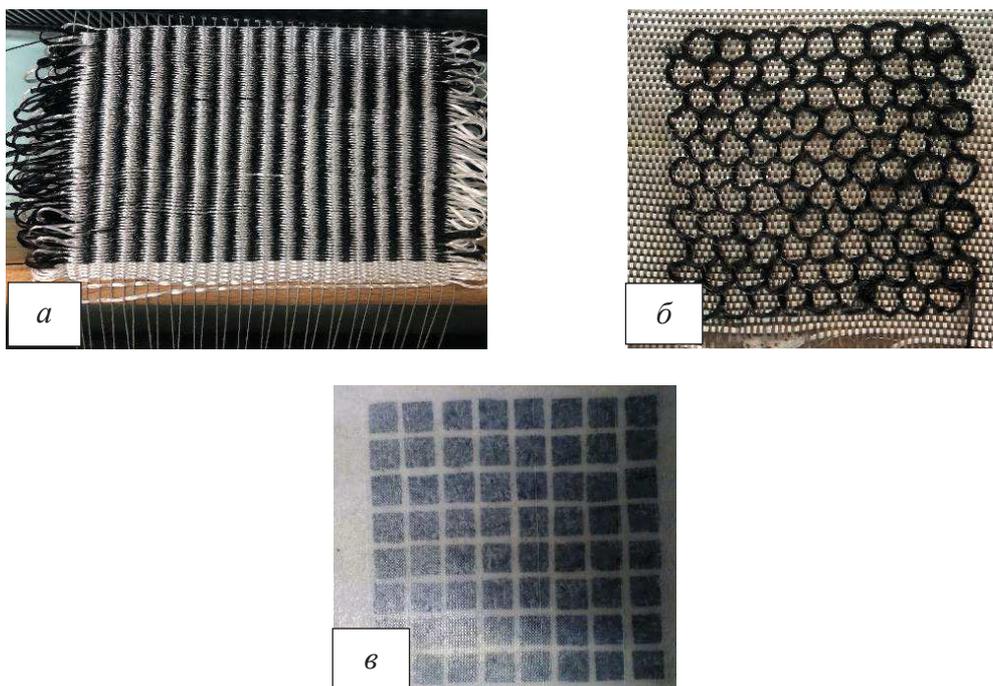
КОМБИНИРОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В КАЧЕСТВЕ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Полимерные композиционные материалы нашли широкое применение во многих областях промышленности и техники благодаря своим превосходным механическим характеристикам и низкой удельной массе. Для расширения их функциональных возможностей эти материалы могут также использоваться как поглотители электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона, для этого необходимо отдельные слои комбинированных композитов создавать в виде метаповерхностей, образуя частотно-селективные поверхности (ЧСП). Чаще всего такие поверхности создаются из массивов резистивных периодических структур: квадратных «патчей» [1]; квадратных рамок [2]; колец [3]; шестигранных рамок [4].

Наиболее часто для создания ЧСП применяют проводящие краски, полимерные резистивные пленки, поверхностные резистивные элементы. Однако, ЧСП на основе проводящих красок и резистивных пленок имеют невысокие прочностные характеристики, поэтому их использование не технологично, поскольку такие поверхности могут истираться при воздействии различных факторов (старение, механический износ) и терять свои свойства, также они не обладают высоки-

ми механическими характеристиками. Практический интерес представляет собой создание материала, обладающего способностью поглощать электромагнитное излучение в заданном частотном диапазоне и при этом пригодным для создания конструкций способных нести высокие нагрузки. Для создания комбинированных композитов с встроенными ЧСП в данной работе предложено использование проводящих углеродных материалов (волокон и тканей).

ЧСП на основе углеродных материалов на поверхности стеклоткани может быть создана следующими методами: ткачество, вышивание, выкладка. Метод ткачества позволяет получать качественные и точные поверхности, однако имеет ограничение: с помощью данного метода возможно создание только линейных структур (по сути, дифракционная решетка). Вышивание снимает ограничения метода ткачества, однако возникают проблемы при формировании поверхности большой площади: углеродная нить начинает перетираться. Метод выкладки позволяет формировать точно поверхность, однако требует большого количества ручного труда. В данной работе опробованы все перечисленные методы (рисунок 1).



а – ткачество; *б* – вышивка; *в* – выкладка

Рисунок 1 – Образцы, полученные по различным технологиям

Образцы заливались эпоксидной смолой и затем помещались под пресс для получения ровных пластин. Отверждение осуществлялось в течение 48 ч при температуре 25 °С.

Образец, полученный по технологии выкладки, испытывался на

определение коэффициента отражения на векторном анализаторе цепей P4M-18 (Mikran), с рабочим диапазоном от 0,1 до 18 ГГц. В качестве приемно-передающей антенны в диапазоне от 1,8 до 3,6 ГГц использовался волноводно-коаксиальный переход сечением 90×45 мм², который через коаксиальный кабель был подключен к входу векторного анализатора. Для измерения коэффициента отражения контролируемый образец устанавливался на волноводно-коаксиальный переход. В качестве диэлектрической подложки использовался фольгированный (с нижней стороны) пенопласт с толщиной 10 мм, 13 мм и 21 мм.

В результате измерений были получены следующие данные:

- образец с толщиной подложки 10 мм в диапазоне частот 2,2–2,3 ГГц поглощает более 90% падающего излучения и на частоте 2,26 ГГц присутствует пик поглощения (свыше 99%);

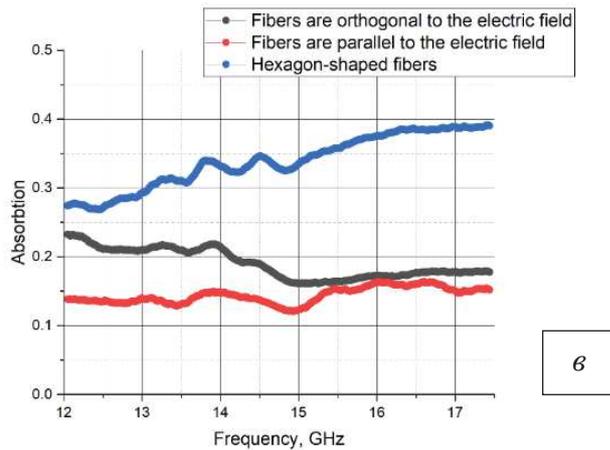
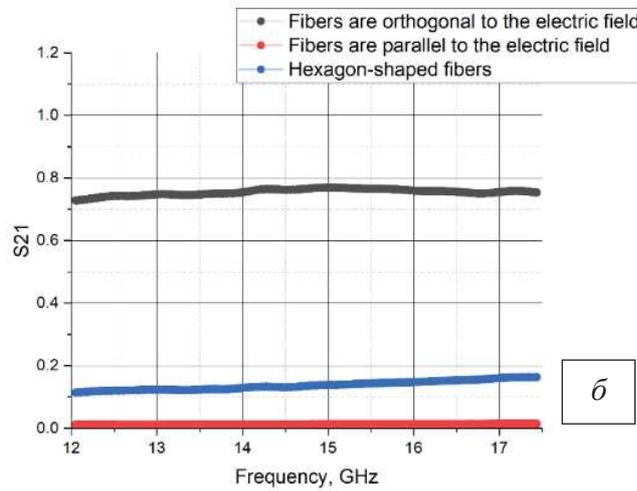
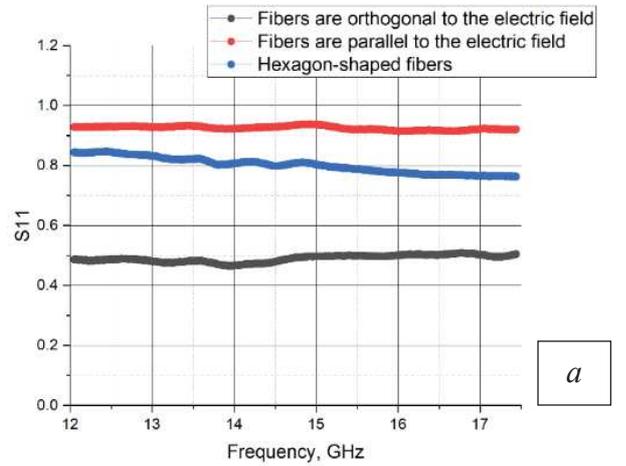
- образец с толщиной подложки 13 мм в диапазоне частот 2,1–2,4 ГГц поглощает более 90% падающего излучения и на частоте 2,21 ГГц присутствует пик поглощения (свыше 99%);

- образец с толщиной подложки 21 мм в диапазоне частот 1,9–2,5 ГГц демонстрирует поглощение свыше 90% падающего излучения и на частоте 2,77 ГГц присутствует пик поглощения (свыше 99%).

Образцы, полученные по технологии ткачества и вышивания, измерялись в частотном диапазоне 12,05–17,44 ГГц. Из цельного куска материала были выпилены образцы размером 16x8 мм, которые помещались в ячейку волновода (электрическое поле ориентировано вдоль меньшей стороны волновода). По измеренным S-параметрам были определены значения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости. Результаты измерений представлены на рисунке 2. Анализ полученных спектров показывает, что в образцах наблюдается ярко выраженная анизотропия электромагнитных свойств. При ориентации волокон вдоль направления электрического поля образцы практически полностью отражают падающую электромагнитную волну. При перпендикулярной ориентации образцы пропускают существенную часть сигнала. При этом их свойства близки к свойствам чистой матрицы без волокон. Гексагональные образцы занимают промежуточное положение между образцами с параллельной и перпендикулярной ориентациями. В них наблюдается максимальное поглощение.

В данной работе представлен новый метод создания комбинированных полимерных композиционных материалов на основе углеродных волокон. Представленные экспериментальные образцы демонстрируют поглощение свыше 90% в области частот 2,2–2,3 ГГц. Для образцов с толщиной подложки 21 мм характерно увеличение диапазона поглощения. Также из полученных зависимостей можно сделать вывод, что при различной толщине диэлектрической подложки пик

поглощения сдвигается. Таким образом подбирая толщину подложки, можно получить пик поглощения в необходимом диапазоне частот.



а) S_{11} -параметр; б) S_{22} -параметр; в) показатель поглощения образцов.

Рисунок 2 – Значение полученных параметров для исследуемых образцов с различной конфигурацией волокон В связи с высокой проводимостью созданных квадратных «пат-

чей» ($10 \div 15 \text{ Ом/м}^2$) и в связи с тем, что квадратные «патчи» имеют большую емкостную составляющую в эквивалентной схеме, очень трудно получить высокие показатели при создании ЧСП. При высокой проводимости элементов ЧСП, как следует из информационных источников [1], лучше создавать элементы ЧСП в виде рамок и колец. Также необходимо: более эффективно использовать волокна с высоким сопротивлением; исследовать возможности изготовления материалов с несколькими слоями ЧСП; создать более сложные единичные ячейки, а именно, нескольких элементов различной величины (нескольких рамок в одной ячейке).

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Bhati, K. R. Hiremath, and V. Dixit, « Design and Characterization of Square Patch Salisbury Screen», Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 76, 7–12, 2018.

2. N. Hakla, S. Ghosh, K. Srivastava. «A Broadband Circuit Analog Absorber Using Resistively Loaded Square Loops», 2017 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC).

3. G. Deng, K. Lv, H. Sun, Yu. Hong, X. Zhang, Z. Yin, and J. Yang. «Wideband absorber based on conductive ink frequency selective surface with polarization insensitivity and wide-incident-angle stability», Nanomaterials and Nanotechnology, 2020, Volume 10: pp, 1–10.

4. S.N. Zabri, R. Cahill and A. Schuchinsky, «Compact FSS absorber design using resistively loaded quadruple hexagonal loops for bandwidth enhancement», Electronics letters 22nd January 2015 Vol. 51 No. 2. - pp. 162–164.

УДК 667.6

Е.Н. Сабадаха, канд. техн. наук, доц.;
И.К. Божелко, канд. техн. наук, зав. кафедрой ТДП (БГТУ, г. Минск);
И.А. Гончарова, канд. биол. наук, вед. науч. сотр.
(БелНИИДАД, г. Минск)

РАЗРАБОТКА ОГНЕ- И БИОЗАЩИТНОЙ ВОДНО-ДИСПЕРСИОННОЙ НЕПИГМЕНТИРОВАННОЙ КОМПОЗИЦИИ

Одним из наиболее эффективных и доступных способов придания огнестойкости различным материалам служит окраска их огнезащитными лакокрасочными материалами. Рыночный спрос движется в сторону высокоэффективных и долговечных водно-