

УДК 687.0

А.Г. Любимов, ст. преп.; А.Ф. Петрушеня, ст. преп.;  
О.М. Касперович, доц.; Л.А. Ленартович, ассист. (БГТУ, г. Минск)  
Г.В. Горохов, мл. науч. сотр.; Д.С. Быченко, ведущ. науч. сотр.;  
П.П. Кужир, зав. лаб. наноэлектромагнетизма  
(НИИ Ядерных проблем БГУ)

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ И ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

Получение материалов с заданными электромагнитными свойствами, пригодных для 3D-печати является важной задачей современного материаловедения и физики твердого тела. Углеродные включения различной морфологии (углеродные нанотрубки, графеновые нанопластинки, углеродные волокна и др.) хорошо зарекомендовали себя в качестве наполнителей при изготовлении полимерных композиционных материалов. Особенно привлекательны композиты с углеродными и наноуглеродными включениями, которые могут применять в качестве поглотителей электромагнитного излучения для снижения заметности для радара. Использование углеродных волокон, обладающих правильной цилиндрической формой, высоким соотношением поперечных размеров и высокой электрической проводимостью позволяет создавать на их основе композиты с высоким коэффициентом поглощения при концентрации включений ниже порога перколяции. Использование таких материалов в 3D-печати позволяет создавать экранирующие элементы сложной конфигурации. Получение филаментов на основе *PLA* и *ABS* с различным содержанием углеродного наполнителя производилось методом смешения в расплаве на двухшнековом экструдере в несколько стадий: получение компаунда, получение филамента из компаунда. В работе использовались следующие полимеры: *PLA Ingeo 4043D* (ПТР 6,0 г/10мин), *ABS MG47F* (ПТР 5,6 г/10мин). В качестве наполнителя применяли отходы производства углеродной нити ОАО «СветлогорскХимволокно» (рисунок 1). Содержание наполнителя составляло 6; 9; 12; 15 мас.%. Затем методом *FDM* печати (диаметр сопла 0,4 мм толщина слоя 0,2 мм) были получены экспериментальные образцы в виде дисков.

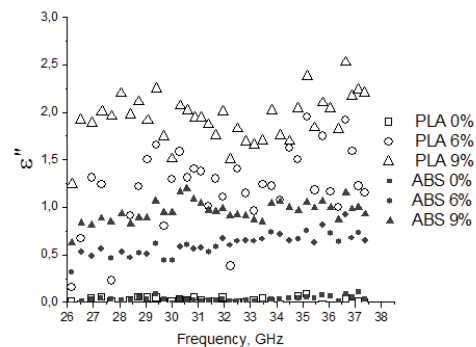
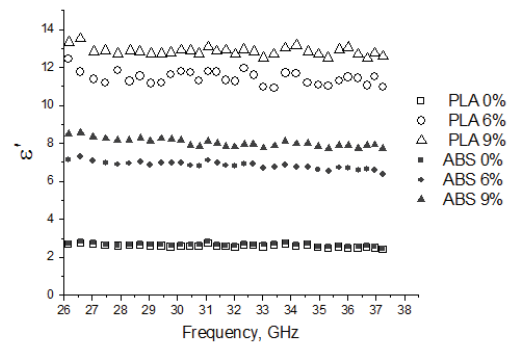
Исследованы электромагнитные свойства полученных образцов в двух частотных диапазонах 0,01–18 ГГц и 26–37 ГГц. Спектры диэлектрической проницаемости были получены из экспериментально измеренных *S*-параметров по методикам, описанным в работах [1-2]. Концентрационная зависимость диэлектрической проницаемости имеет сходный характер для обоих типов композитов: при увеличении

концентрации наполнителя наблюдается рост обоих компонент комплексной диэлектрической проницаемости. Помимо этого, установлено, что значения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  при фиксированной концентрации наполнителя выше для композитов на основе *ABS*, т.е. эффективная концентрация для композитов на основе *ABS* ниже, чем в матрице *PLA*, из-за разницы в распределении наполнителя в полимере, которая определяется химическим строением полимера и его реологическими свойствами. Достаточно высокие значения диэлектрической проницаемости полученных материалов позволяют рассматривать углерод-

ные микроволокна в качестве дешевой альтернативы наноуглеродным наполнителям для различных применений [3]. Разница в пространственном распределении однородного наполнителя в разных полимерах делает *ABS* более подходящей полимерной матрицей для практических применений, связанных с поглощением микроволнового излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 J. Baker-Jarvis, R. G. Geyer, and P. D. Domich, "A nonlinear least-squares solution with causality constraints applied to transmission line permittivity and permeability determination," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 41, №. 5, pp. 646–652, Oct. 1992.
- 2 V. A. Zhuravlev, V. I. Suslyayev, E. Y. Korovin, and K. V. Dorozhkin, "Electromagnetic Waves Absorbing Characteristics of Composite Material Containing Carbonyl Iron Particles," *Mater. Sci. Appl.*, vol. 05, № 11, pp. 803–811, 2014.
- 3 D. S. Bychanok, A. O. Plyushch, G. V. Gorokhov, U. S. Bychanok, P. P. Kuzhir, and S. A. Maksimenko, "Microwave radiation absorbers based on corrugated composites with carbon fibers," *Tech. Phys.*, vol. 61, №. 12, pp. 1880–1884, 2016.



**Рисунок 1- Комплексная диэлектрическая проницаемость напечатанных образцов**