

## Композиты на основе термопластичного полиуретана и технического углерода для электромагнитной совместимости в микроволновом и терагерцовом диапазонах\*

А.В. Бадьин<sup>1</sup>, Г.Е. Кулешов<sup>1</sup>, В.А. Журавлев<sup>1</sup>, К.В. Дорожкин<sup>1</sup>,  
И.М. Томилов<sup>1</sup>, Д.С. Кателина<sup>1</sup>, В.Д. Москаленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Приведены результаты исследования электрофизических свойств композиционного материала, содержащего технический углерод в полимерной матрице из термопластичного полиуретана. Представлены результаты оптической микроскопии. Измерения электромагнитного отклика от материала проводились в коаксиальной волноводной ячейке в диапазоне частот от 0.1 до 18 ГГц и в квазиоптическом спектрометре в диапазоне частот 115–258 ГГц. Показано, что добавление в термопластичный полиуретан одинаковых долей технического углерода приводит к почти линейному росту комплексной диэлектрической проницаемости.

**Ключевые слова:** электрофизические свойства, полимерные композиты, аддитивная технология, коэффициент прохождения, технический углерод.

### Введение

В последнее время наблюдается заметный рост числа исследований в области электромагнитной совместимости и экранирования, что обусловлено растущими требованиями к защите радиоэлектронных устройств, аэрокосмической техники и микроэлектроники от естественных и наведенных помех [1, 2]. Современные аддитивные технологии открывают новые возможности для создания функциональных материалов, предназначенных для эффективного поглощения и отражения электромагнитных волн. 3D-печать, основанная на методе послойного наплавления материала (FDM), позволяет с высокой скоростью и низкой себестоимостью изготавливать многослойные конструкции и изделия сложной геометрии, что делает ее перспективной для разработки эффективных экранирующих структур при использовании композиционных филаментов [3, 4]. Среди них особо выделяют проводящие пластики для 3D-печати на основе углеродных структур, металлических включений или полимеров с собственной электропроводимостью [5, 6]. Ключевым фактором, определяющим свойства таких композитов, является состав и концентрация наполнителей.

Традиционно для создания экранирующих материалов использовались композиты с наполнителями на основе порошков металлов с высокой проводимостью (медь, алюминий, никель). Однако их применение в аддитивной технологии методом послойного наплавления ограничивается рядом факторов. Прежде всего, для получения электропроводящего филамента требуется тесный контакт между частицами и, следовательно, большие концентрации наполнителя в полимере, что приводит к значительному снижению механо-прочностных свойств, увеличению веса материала и технологическим сложностям при изготовлении тонкостенных конструкций [7, 8]. В связи с этим возрастает интерес к углеродным наполнителям, таким как технический углерод (ТУ), углеродные нанотрубки и графен, которые сочетают легкость, гибкость и высокую эффективность экранирования [9].

Среди углеродных материалов ТУ представляет особый интерес благодаря своей доступности, низкой стоимости, хорошей электропроводности и совместимости с полимерными матрицами, что делает его перспективным для использования в аддитивных технологиях [10–12]. Кроме того, углеродные материалы обладают выдающейся термостойкостью и способностью эффективно рассеивать электромагнитную энергию, что позволяет создавать на их основе легкие и эффективные поглотители.

Таким образом, разработка новых полимерных композиционных материалов для снижения уровня электромагнитного излучения и использования в технологии 3D-печати является актуальной задачей [13, 14].

\* Научное исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-20174, <https://rscf.ru/project/25-29-20174/> и средств Администрации Томской области.