

УДК 537.868.3:537.874.72

## СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ КОМПОЗИТОВ В ДИАПАЗОНЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ РАДИОВОЛН

© 2020 г. Д. А. Каликинцева<sup>1, \*</sup>, В. Ю. Бузько<sup>2</sup>, С. А. Вызулин<sup>1</sup>, А. И. Горячко<sup>2</sup>,  
Л. И. Сарин<sup>3</sup>, О. А. Коланцев<sup>3</sup>, Е. Л. Мирошниченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования  
“Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко” Министерства обороны  
Российской Федерации, Краснодар, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Кубанский государственный университет”, Краснодар, Россия

<sup>3</sup>Общество с ограниченной ответственностью “Болид”, Новосибирск, Россия

\*E-mail: delson17@yandex.com

Поступила в редакцию 19.03.2020 г.

После доработки 10.04.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Исследованы радиоэкранирующие и радиопоглощающие свойства трехфазных композитов ЭКОМ-П/графит/парафин в УКВ-диапазоне. Определено влияние концентрации компонентов радиопоглощающего наполнителя композита на его диэлектрические проницаемость и потери, электрическую проводимость.

DOI: 10.31857/S0367676520090161

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие электронной техники требует совершенствования средств экранирования технических устройств от высокочастотного и сверхвысокочастотного электромагнитного излучения (ЭМИ). В настоящее время широко используются разнообразные виды радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов (РПМ). Высокая электропроводность радиоэкранирующих материалов приводит к высокому коэффициенту отражения ЭМИ от поверхности экрана на их основе и соответственно к высокому коэффициенту электромагнитного экранирования [1]. Для большинства радиотехнических изделий характерно наличие коммутационных или вентиляционных отверстий. Использование электропроводящего материала для изготовления радиоэкранирующего корпуса приводит к возникновению резонанса стоячей электромагнитной волны внутри корпуса и утечке ЭМИ через такие отверстия [2–7]. Указанные процессы могут существенно уменьшить эффективность мер по радиоэкранированию.

Использование РПМ на основе магнито-диэлектрических композитов без комбинирования с электропроводящими радиоотражающими экранами может быть недостаточно эффективным для практических целей радиоэкранирования [7]. Большинство образцов РПМ, как правило, высокоэффективны для снижения отражения ЭМИ от ме-

таллической поверхности. Коэффициент экранирования ЭМИ в УВЧ- и ближнем СВЧ-диапазоне для радиопоглощающих покрытий (РПП) обычно не достигает высоких значений (менее 10 дБ) [8]. Для эффективного радиоэкранирования технических средств при наличии технологических отверстий в корпусе требуется использование РПП, совмещающего в себе радиоэкранирующие и радиопоглощающие свойства. Указанное покрытие должно иметь небольшой коэффициент отражения (что снизит утечки ЭМИ через отверстия) и высокий коэффициент поглощения ЭМИ. Такими свойствами могут обладать РПП, созданные на основе композитов, в состав которых входят не только магнитные, но и электропроводящие материалы [9].

Целью работы является исследование влияния концентрации графита, как электропроводящего наполнителя, на диэлектрические, электропроводящие, радиопоглощающие и радиоэкранирующие характеристики композитного материала на основе промышленно-производимого магнитного порошка ЭКОМ-П.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Созданный композитный материал изготавливался из магнитного электропроводящего наполнителя, равномерно распределенного в немагнит-

ной матрице. В качестве матрицы использован парафин, выбор которого обусловлен: 1) низкой температурой плавления; 2) удобством изготовления образцов; 3) близостью электромагнитных параметров парафина к аналогичным параметрам инженерных пластиков типа полиалкенов (полиэтилен, полипропилен и т.п.). В качестве наполнителя использован промышленно выпускаемый магнитный материал ЭКОМ-П (производитель – ООО Болид (РФ)) и хлопьевидный порошок графита (производитель – компания Acros Organics (Бельгия)).

Порошок ЭКОМ-П перемешивался с графитом, концентрация ( $C$ ) которого по массе менялась и составляла 0–30% с шагом 5% от общей массы наполнителя. Общая концентрация магнито-диэлектрического наполнителя по массе в композитах контролировалась и составляла 80%. Парафин нагревался до  $T = 90^\circ\text{C}$  и тщательно перешивался с наполнителем до получения однородного состава.

Из оригинального композитного материала изготавливались образцы в форме шайб. Шайбы имели внутренний и внешний диаметры 3.05 и 7.0 мм и толщину – 1 мм.

Радиоэкранирующие и радиопоглощающие свойства образцов исследовались с помощью векторного анализатора цепей “Deerace KC901V”. Измерения производились в частотном диапазоне 0.015–7 ГГц в согласовано-нагруженной коаксиальной линии. Измерялись  $S$ -параметры образцов в линии передачи со вставкой в виде шайбы из композитного материала.

Используя экспериментально измеренные значения  $S$ -параметров рассчитывались коэффициенты отражения ( $R$ ), пропускания ( $T$ ), поглощения ( $A$ ) и эффективного поглощения ( $A_{eff}$ ):

$$R = |S_{11}|^2, \quad T = |S_{21}|^2, \quad A = 1 - R - T, \\ A_{eff} = \frac{1 - R - T}{1 - R}.$$

Электрическая проводимость композитов по постоянному току ( $\sigma$ ) измерялась двухзондовым методом измерителем сопротивлений “УТ-601”.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрационные зависимости коэффициентов  $R$ ,  $T$ ,  $A$  и  $A_{eff}$  для исследуемых образцов на частоте 1 ГГц представлены на рис. 1.

Установлено, что увеличение концентрации графита в композите приводит к: 1) уменьшению коэффициента пропускания  $T$ ; 2) увеличению коэффициента отражения  $R$  ЭМИ; 3) немонотонному изменению коэффициента поглощения  $A$ ; 4) увеличению эффективного поглощения  $A_{eff}$ . Немонотонный характер зависимости  $A(C)$  обу-

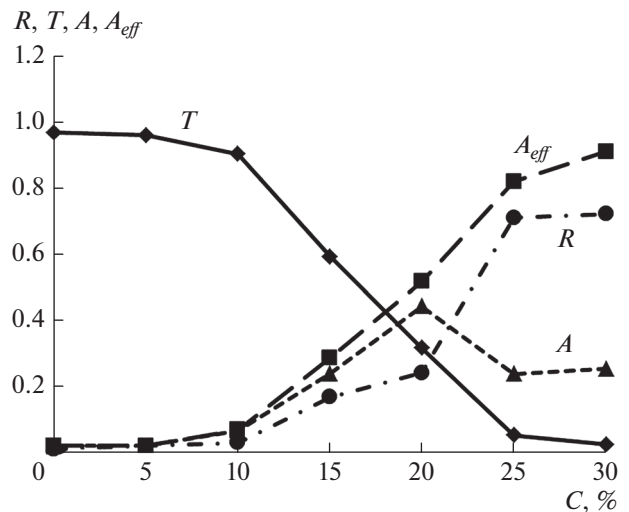


Рис. 1. Зависимости коэффициентов отражения  $R$ , пропускания  $T$ , поглощения  $A$  и эффективного поглощения  $A_{eff}$  от концентрации графита  $C$  в наполнителе на частоте 1 ГГц для образца толщиной 1 мм.

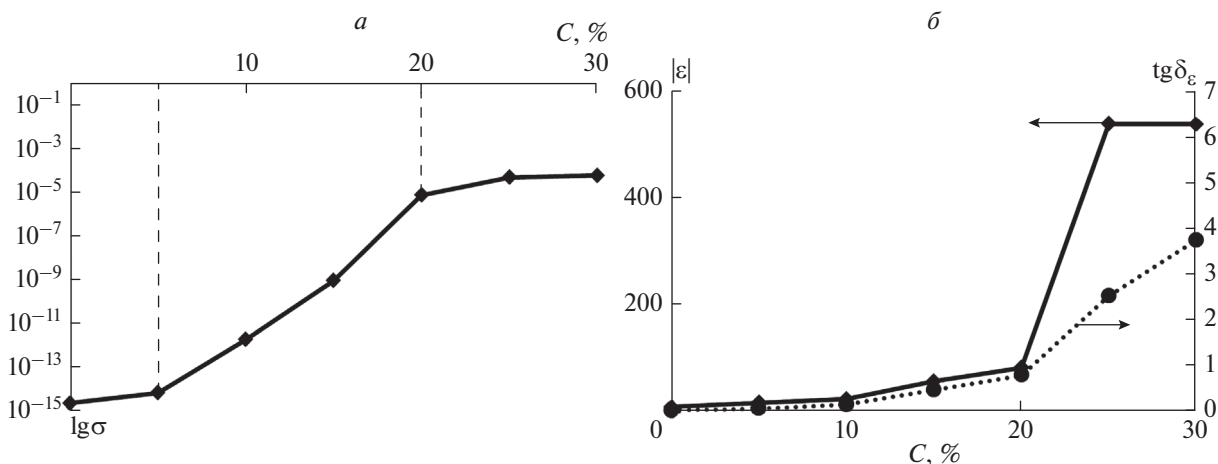
словлен увеличением  $R$  с ростом  $C$ . Наблюдаемый характер зависимости  $A_{eff}(C)$  указывает на увеличение радиопоглощающих свойств исследуемого композита с ростом  $C$ .

По алгоритму Николсона–Росса–Вейра [6], используя экспериментально измеренные параметры матрицы рассеяния (модуль и фазу коэффициентов  $S_{11}$  и  $S_{21}$ ), рассчитывались  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$ , где  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  – реальная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ .

Рассчитанные зависимости модуля комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от концентрации графита  $C$  представлены на рис. 2а. Измеренные значения электрической проводимости композита представлены на рис. 2б.

Увеличение  $C$  приводит к увеличению диэлектрической проницаемости и потерь, а также электрической проводимости, что в свою очередь, в соответствии с [10, 11], влияет на величину коэффициентов отражения и эффективного поглощения. Концентрационная зависимость электропроводности материала на основе магнитного материала и графита имеет две точки перегиба, при  $C = 5$  и 20%. Аналогичный характер концентрационной зависимости имеет композит на основе молотого углеродного волокна [11] и водный раствор углеродных нанотрубок [12].

При достижении электрической проводимости композитов на постоянном токе величины более  $1 \cdot 10^{-5}$  См/м тангенс угла диэлектрических потерь превышает единицу, а эффективность электромагнитного экранирования компо-



**Рис. 2.** Зависимость модуля комплексного значения диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь (а) на частоте 1 ГГц и проводимости композитов по постоянному току (б) от концентрации графита в наполнителе.

зитным образцом толщиной 1 мм на частоте 1 ГГц превышает 4 дБ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что увеличение концентрации графита в трехфазном композите ЭКОМ-П/графит/парафин приводит к увеличению модуля комплексной диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь. Увеличение указанных характеристик, в свою очередь способствует увеличению радиоэкранирующих и радиопоглощающих свойств композитных покрытий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Duan Y., Guan H. Microwave absorbing materials. Singapore: Pan Stanford Publ., 2017.
2. Olyslager F., Laermans E., Zutter D. et al. // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 1999. V. 41. № 3. P. 202.
3. Bahadorzadeh M., Moghaddasi M.N., Attari A.R. // PIER Lett. 2008. V. 1. P. 45.
4. Araneo R., Lovat G. // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2009. V. 51. № 2. P. 274.
5. Khan Z.A., Bunting C.F., Deshpande M.D. // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2005. V. 47. № 1. P. 112.
6. Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P. et al. Microwave electronics measurement and materials characterization. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
7. Celozzi S., Araneo R., Lovat G. Electromagnetic shielding. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2008.
8. Yu L.J., Ahmad S. H., Appadu S. // WJE. 2014. № 11(4). P. 317.
9. Tong C. Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding. Boca Raton: CRC Press, 2009.
10. Bhingardive V., Suwas S., Bose S. // RSC Adv. 2015. № 5. Art. № 79463.
11. Kalikintseva D.A., Vyzulin S.A., Miroshnichenko E.L. et al. // Proc. XXVI IMFM (Moscow, 2018). P. 536.
12. Вызулин Е.С., Вызулина В.И. // Мат. XII Всеросс. науч.-практ. конф. "Матем. мет и инф.-тех. средств". (Краснодар, 2016). С. 58.