

УДК 537.868.3:537.874.72

## РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МИКРОДИСПЕРСНОГО УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

© 2021 г. С. А. Вызулин<sup>1</sup>, В. Ю. Бузько<sup>2</sup>, Д. А. Каликинцева<sup>1</sup>, \*, А. И. Горячко<sup>2</sup>,  
Е. Л. Мирошниченко<sup>1</sup>, А. В. Винокуров<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

\*E-mail: delson17@yandex.com

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Исследованы радиопоглощающие характеристики композитов на основе микродисперсного углеродного волокна и полимерной матрицы. Получены зависимости удельной электропроводимости и диэлектрической проницаемости от концентрации углеродного волокна. Определены концентрации углеродного волокна, при которых радиопоглощающие свойства исследуемого материала максимальны.

DOI: 10.31857/S0367676521090337

### ВВЕДЕНИЕ

На основе композитных радиопоглощающих материалов (КРМ) возможно создание электромагнитных экранов, которые могут заменить массивные металлические экранирующие конструкции [1]. Применение КРМ для экранирования технических средств позволяет снизить утечки электромагнитного излучения через технологические отверстия в конструкциях корпуса устройства. На способность поглощать энергию радиоволн влияет состав наполнителя. Радиопоглощающие материалы на основе магнетиков проявляют радиопоглощающие свойства в СВЧ диапазоне [2]. Однако добавление в состав КРМ электропроводящего компонента позволяет обеспечить как радиопоглощающие, так и радиоэкранирующие свойства материала [3]. Цель работы – изучить влияние концентрации электропроводящего наполнителя на РПХ композита на основе углеродного волокна.

### ОБРАЗЦЫ

Исследованы образцы материалов, состоящие из углеродного волокна (УВ), равномерно распределенного в полимерной матрице. УВ имело вид порошка. Оно было получено из промышленно выпускаемого материала путем перемалывания в керамической ступке. Для повышения дисперсности полученный порошок просеивался через сито из нержавеющей стали с размером ячеек

50 мкм. Характерный вид микрофотографии порошка, полученной с помощью микроскопа “JEOL JSM – 7500F”, представлен на рис. 1а. По микрофотографии определены средние значения длины и диаметра УВ, которые составляли около 20 и 4 мкм, соответственно. Аспектное соотношение – отношение средних длин углеродных волокон к их средним диаметрам – для использованного УВ имело величину порядка 5.

В качестве матрицы в композитах использован парафин, который нагревался до  $T = 90^\circ\text{C}$  и перешивался с УВ до получения однородного состава.

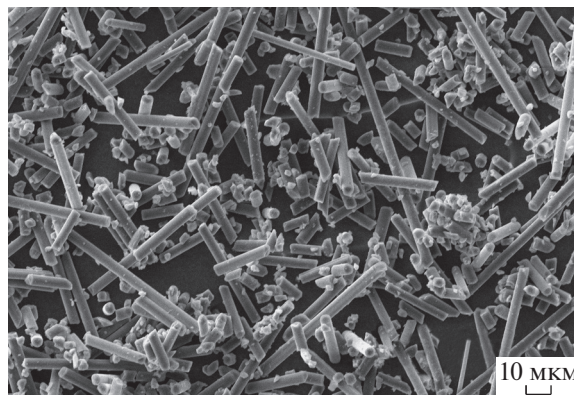


Рис. 1. Микрофотография микродисперсного УВ.

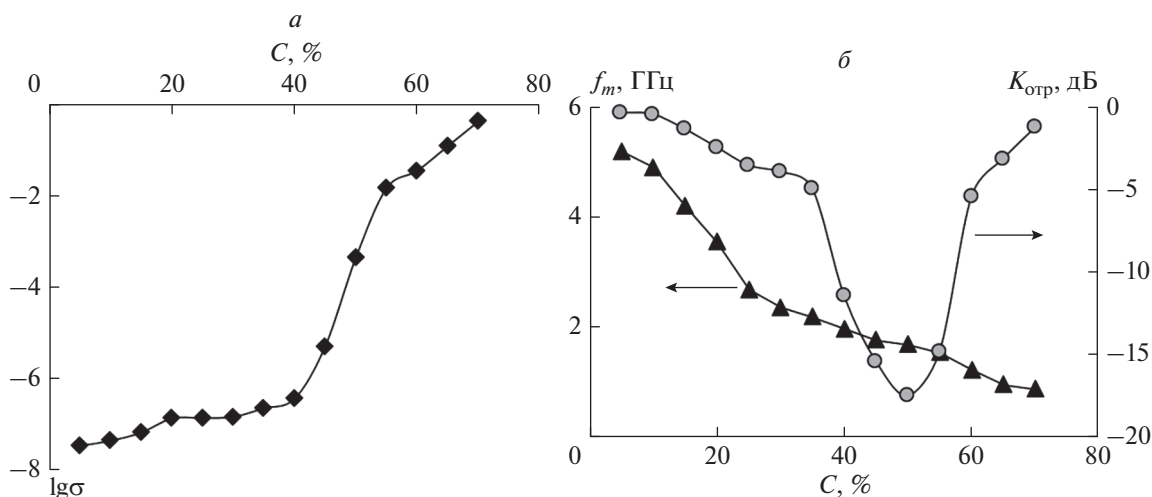


Рис. 2. Концентрационные зависимости логарифма удельной электрической проводимости  $\lg \sigma$  (а), коэффициента отражения в короткозамкнутой линии  $K_{отр}$  и частоты согласования  $f_m$  (б).

Низкое аспектное соотношение способствует равномерному распределению частиц УВ в композите.

Концентрация УВ ( $C$ ) по массе в композитах контролировалась и менялась от 5 до 70% с шагом 5%. Изготавливались образцы двух типов – в виде цилиндров (диаметр  $\varnothing = 5$  мм и высота 10 мм) и в виде шайб (внутренний  $\varnothing = 7$  мм, внешний  $\varnothing = 16$  мм, толщина – 10 мм). Образцы первого типа использовались при исследовании свойств синтезированных материалов по постоянному току, а второго – по переменному току (в СВЧ диапазоне).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для опытной оценки радиопоглощающих свойств исследованы свойства композитных материалов по постоянному и переменному току. В первом случае измерялась удельная электропроводность. Во втором – параметры рассеяния электромагнитной волны (ЭМВ) в линии передачи с образцом. Проводимость композитов по постоянному току ( $\sigma$ ) измерялась двухзондовым методом измерителем сопротивлений “УТ-601” (схема 1). Параметры рассеяния ЭМВ в линии передачи с композитным материалом исследовались с помощью векторного анализатора цепей “Deerace KC901V” на частотах 0.03–7 ГГц. Измерения производились для двух режимов:

1) определение комплексного коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) в короткозамкнутой линии (схема 2). Установлено, что спектр отраженного сигнала представляет собой кривую с явно выраженным минимумом. В точке экстремума определяются значение частоты согласования ( $f_m$ ), и значение коэффициента отражения ( $K_{отр}$ ). Величина параметра  $K_{отр}$  характеризует радиопоглощающие свойства вставки. Действительно, для использованной схемы эксперимента  $K_{отр}$  определяется в основном

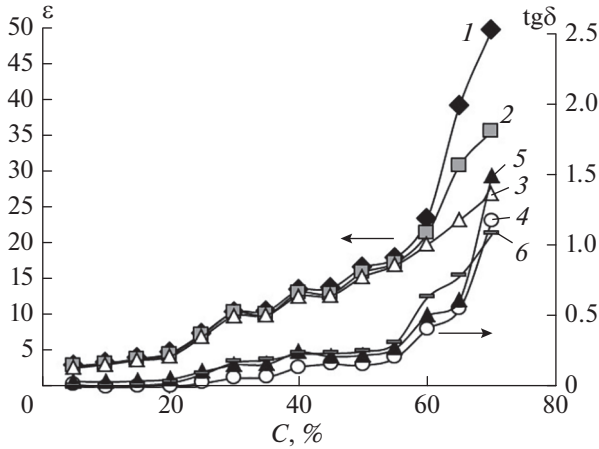
энергией отраженных волн (энергия падающей ЭМВ поддерживалась постоянной). Затухание ЭМВ в образце приводит к уменьшению энергии волны, отраженной от границы вставка–металл короткозамыкателя. Минимум  $K_{отр}$  соответствует максимальному поглощению энергии;

2) измерение  $S$ -параметров в согласовано-нагруженной линии (схема 3). По алгоритму Николсона–Росса–Вейра [4], используя экспериментально измеренные параметры матрицы рассеяния (модуля и фазы  $S_{11}$  и  $S_{21}$ ), рассчитывали  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ , где  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  – реальная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . При расчете учитывалось, что для композитов на основе углеродного волокна  $\mu = 1$  [5].

Радиопоглощающие свойства изотропных материалов можно характеризовать величиной удельного поглощения. Измерить непосредственно удельный коэффициент затухания не представляется возможным, т.к. на практике мы, как правило, имеем дело с радиопоглощающими покрытиями (образцами конечных размеров). В этом случае коэффициент поглощения зависит (см. например [6]), как от электрических параметров ( $\epsilon$  и  $\mu$ ), так и от размеров образца. В силу этого обстоятельства для каждой из схем эксперимента радиопоглощающие свойства композита будем характеризовать своим параметром. Способность КРМ поглощать энергию ЭМВ для схемы 1 будем характеризовать величиной  $\sigma$ ; для схемы 2 – параметром  $K_{отр}$ ; для схемы 3 – тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg} \delta = \epsilon''/\epsilon'$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Зависимость  $\sigma(C)$  представлена на рис. 2а. На графике наблюдается две точки перегиба: при  $C \approx 40$  и  $55\%$ . Увеличение концентрации УВ в ком-



**Рис. 3.** Концентрационные зависимости диэлектрической проницаемости на частотах 1 (1), 2 (2) и 3 (3) ГГц, и тангенса угла диэлектрических потерь на частотах 1 (4), 2 (5) и 3 (6) ГГц.

позите от 5 до 40% приводит к увеличению электрической проводимости композита по постоянному току в 10 раз, от 40 до 55% – в  $10^4$  раз, а от 55 до 70% – в 30 раз. Качественное подобие наблюдаемых зависимостей  $\sigma(C)$  и концентрационной зависимости электропроводности для смеси углеродных нанотрубок в воде [7] указывает на сходство механизма проводимости в двухфазных системах с электропроводящими наполнителями. Можно предположить, что в композите УВ/парафин при  $C \approx 40\text{--}55\%$  происходит переход от системы распределенных частиц к системе связанных частиц. Под системой распределенных частиц понимается двухфазная система, в которой частицы наполнителя не соприкасаются между собой, а в системе связанных частиц – соприкасаются. Ранее авторами была обнаружена подобная концентрационная зависимость электропроводности композита на основе магнитного материала ЭКОМ-П и графита [3].

На рис. 2б представлены зависимости  $K_{отр}$  от концентрации УВ на частоте согласования. Зависимость не монотонная: сначала наблюдается рост величины  $|K_{отр}|$ , а затем уменьшение. Полученные результаты согласуются с результатами работ [8–11]. Максимальное значение  $|K_{отр}| \approx 17$  дБ наблюдалось для композитов с  $C \approx 50\%$ . Для композитов с  $40 < C < 55\%$  величина  $|K_{отр}| \geq 10$  дБ. Диапазон  $C$ , при которых величина  $|K_{отр}|$  максимальна совпадает с диапазоном, в котором наблюдается скачок  $\sigma$  (переход от системы распределенных частиц к системе связанных частиц). Наблюдаемая корреляция может служить обоснованием упрощенной оценки радиопоглощающих свойств композитных материалов по электропроводности. Уменьшение  $|K_{отр}|$  при  $C > 50\%$  обусловлено увели-

чением  $K_{отр}$  от границы воздух – образец. В силу этого обстоятельства  $|K_{отр}|$  может характеризовать радиопоглощающие свойства только при не очень высоких  $C$  проводящего наполнителя.

На рис. 2в представлены концентрационные зависимости частоты согласования  $f_m$ . Видно, что увеличение концентрации УВ в композите приводит к снижению частоты согласования от 3.55 при  $C = 5\%$  до 0.88 ГГц при  $C = 70\%$ .

Зависимости модуля комплексного числа  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  от концентрации УВ в композите на частотах 1, 2 и 3 ГГц представлены на рис. 3. Рост концентрации УВ приводит к увеличению не только  $\epsilon$ , но и  $\text{tg}\delta$ . При  $C = 40\text{--}55\%$  величина  $\epsilon \in [12, 18]$ , а  $\text{tg}\delta \in [0.15, 0.3]$ . Увеличение  $C$  с 5 до 70% приводит к увеличению  $\epsilon$  с 2.6 до 49.5 и увеличению  $\text{tg}\delta$  с 0.005 до 1.5. Известно [6], что частота согласования для линии передачи с диэлектрической вставкой определяется выражением:  $f_m = c^2 / (4d\sqrt{\epsilon\mu})$ . С учетом этого соотношения, зависимость частота согласования может быть объяснена увеличением диэлектрической проницаемости композита с ростом концентрации УВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы радиопоглощающие характеристики (РПХ) композитов из микродисперсного углеродного волокна с аспектным соотношением около 5. Результаты, полученные разными способами, согласуются между собой – увеличение концентрации УВ приводит к увеличению электрической проводимости, диэлектрической проницаемости, диэлектрических потерь и снижению частоты согласования. Установлено, что максимальные радиопоглощающие свойства образцов композитных материалов на основе УВ/парафин на частотах 1–3 ГГц проявляются при  $C = 40\text{--}55\%$ . В указанном диапазоне частот образцы характеризуются максимальными значениями  $|K_{отр}|$ , а также наблюдается быстрое увеличение электропроводности композитов. Образцы на основе электропроводящего наполнителя с максимальными радиопоглощающими свойствами могут быть определены с использованием концентрационных зависимостей электропроводности композитов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Olyslager F., Laermans E., Zutter D. et al. // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 1999. V. 41. No. 3. P. 202.
2. Каликинцева Д.А., Бузько В.Ю., Вызулин С.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 1. С. 112.
3. Каликинцева Д.А., Бузько В.Ю., Вызулин С.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 9. С. 1304; Kalikintseva D.A., Buz'ko V.Y., Vyzulin S.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 9. P. 1110.

4. *Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P. et al.* Microwave electronics measurement and materials characterization. John Wiley & Sons Ltd., 2004.
5. *Zhao N., Zou T., Shi C. et al.* // Mater. Sci. Eng. B. 2006. No. 127. P. 207.
6. *Duan Y., Guan H.* Microwave absorbing materials. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2017.
7. *Вызулин Е.С., Вызулина В.И.* // Матер. XII Всеросс. НПК "Мат. методы и инф.-тех. средства". Краснодар: ун-т МВД России, 2016. С. 58.
8. *Jian X., Chen X., Zhou Z. et al.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2015. No. 17. P. 3024.
9. *Yu H., Wang T., Wen B. et al.* // J. Mater. Chem. 2012. No. 22. Art. No. 21679.
10. *Liu Z., Bai G., Huang Y. et al.* // J. Phys. Chem. C. 2007. No. 111. Art. No. 13696.
11. *Liu L., Zhou K., He P., Chen T.* // Mater. Lett. 2013. No. 110. P. 76.

## Microwave absorbing characteristics of carbon fiber powder-based composites

**S. A. Vyzulin<sup>a</sup>, V. Y. Buz'ko<sup>b</sup>, D. A. Kalikintseva<sup>a,\*</sup>, A. I. Goryachko<sup>b</sup>,  
E. L. Miroshnichenko<sup>a</sup>, A. V. Vinokurov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Krasnodar Higher Military School, Krasnodar, 350035 Russia*

<sup>b</sup>*Kuban State University, Krasnodar, 350040 Russia*

*\*e-mail: delson17@ymail.com*

The microwave absorbing characteristics of carbon fiber (CF) and polymer matrix-based composites were investigated. The concentration dependences of the electrical conductivity and permittivity of the CF/paraffin composite were studied. The concentration of CF at which the microwave absorbing properties of the composite reach a maximum value is determined.