

Литература

1. Получение методом ионно-лучевого распыления кислородом и оптические свойства ультратонких пленок золота / А. И. Стогний [и др.] // Журн. техн. физики. – 2003. – Т. 73, № 6. – С. 86–89.
2. Bundesmann, C. Tutorial: The systematics of ion beam sputtering for deposition of thin films with tailored properties / C. Bundesmann, H. Neumann // Journal of Applied Physics 124, 231102 (2018) ; Mode of access: <https://doi.org/10.1063/1.5054046>.
3. О неоднородном характере начальной стадии ионно-лучевого осаждения ультратонких пленок золота / А. И. Стогний [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, № 6. – С. 87–94.

УДК 537.531:678.073:678.046

**ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ  
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА**

**В. А. Банный**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
медицинский университет», Республика Беларусь*

**И. В. Царенко, С. И. Красюк**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Эксплуатация радиотехнических систем СВЧ приводит к повышению естественного уровня электромагнитного фона, вызывает проблемы электромагнитного загрязнения, электромагнитной безопасности и электромагнитной совместимости радио- и электронной техники. Одним из перспективных средств решения указанных проблем являются композиционные радиопоглощающие материалы (РПМ). Существующая номенклатура композиционных РПМ включает множество материалов, изготавливаемых по оригинальным технологиям. Свою нишу среди современных РПМ занимают композиты на основе конструкционных крупнотоннажно выпускаемых термопластов, в частности, полиэтилена (ПЭ) и функциональных наполнителей (ФН). Такие РПМ привлекают малой удельной массой и технологичностью, обеспечивая электромагнитную совместимость узлов электронной аппаратуры и регулируемый уровень электрических и магнитных потерь при взаимодействии с радиоизлучением.

Цель работы состояла в оценке электрических и теплофизических параметров композиционных РПМ на основе ПЭ.

Объектами исследований служили листовые композиционные РПМ на основе ПЭ (ГОСТ 16803-070). В качестве ФН использовали магнитные и электропроводящие вещества: дисперсные магнитно-мягкий марганец-цинковый феррит (ММФ, ТУ 6-09-5111–84, марка 2500 НМС), углеродную ткань Бусофит Т-1, стеклосферы.

Методом термического прессования изготовлены экспериментальные образцы конструкционного листового РПМ. Образцы РПМ выполнены в соответствии с принципами размерно-рецептурной и структурной оптимизации по критерию наилучшего радиопоглощения [1], [2]. С применением комплекса физических и физико-химических методов исследования оценены электрические и теплофизические характеристики монолитных композиционных РПМ. Электро- и теплофизические характеристики РПМ определяли по стандартным методикам. Для измерения электрического сопротивления образцов РПМ использовали вольтметр универсальный цифровой В27А; для измерения тангенса угла диэлектрических потерь и электро-

проводности – измеритель Е7-8. Микрокалориметрический анализ осуществляли на дифференциальном сканирующем микрокалориметре ДСМ-3А. Испытания по определению температуры размягчения термопластов по Вика (ГОСТ 15088–83) проводили в воздушной среде на приборе FWV «Fritz Heckert».

Поглощение энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) композитным РПМ, как правило, сопровождается выделением значительного количества тепловой энергии, которая может быть разрушительна для материала [3]–[5]. Поэтому целесообразно было исследовать теплофизические параметры образцов разработанных композиционных материалов, прежде всего, теплопроводность и теплостойкость. Результаты исследований электрических и теплофизических параметров РПМ представлены в таблице, где для сравнения приведены аналогичные параметры РПМ марки ХВ-10,6 (ТУ 6-00-5761783-322–89), промышленно выпускаемого ООО «Гелиус» (г. Владимир, Россия).

**Электро- и теплофизические параметры листовых радиопоглощающих материалов**

Параметры	Наименование образцов					
	Промышленный ХВ-10,6, ТУ6-00-5761783-322–89; $h = 3,2$ мм	Экспериментальные, $h = 3$ мм				
		ПЭ 16803-070	ПЭ + ММФ (50 %, 63–100 мкм)	ПЭ + ММФ (50 %, 160–200 мкм)	ПЭ + ММФ (50 %, 160–200 мкм) + стеклосферы (10 %)	ПЭ + ММФ (50 %, 160–200 мкм) + углеткань
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,39	0,92	1,49	1,55	1,67	1,47
$T_{пл}$ , °С	–	108,0	108,4	105,1	–	–
$T_{кр}$ , °С	–	90,4	90,4	90,5	–	–
Теплостойкость по Вика, °С	–	92	93	97	96	95*
Теплопроводность, Вт/(м · К)	0,78	0,28	0,42	0,37	–	–
Электропроводность, Ом <sup>-1</sup> · м <sup>-1</sup>	–	$10^{-15}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,07	0,0005	0,37	–	0,02	–

Методом ДСК установлены температуры фазовых переходов РПМ на основе ПЭ и ММФ, полученных методом термического прессования. Был введен в полимерную матрицу на стадии смешения порошкообразных составляющих ММФ различной дисперсности. Установлено (см. таблицу), что наполнение ПЭ дисперсным ММФ (50 мас. %) с размером частиц 63–100 мкм, в одном случае, и 160–200 мкм – в другом, приводит к незначительному изменению температуры плавления и кристаллизации связующего термопластичных образцов РПМ. Иная картина наблюда-

ется при более «жестких» условиях переработки и изготовления композитных РПМ, в частности, для melt-blown нетканых РПМ [6], [7]. В этом случае взаимодействие наполнителя и связующего значительно влияет на фазовые и релаксационные переходы последнего.

Как и следовало ожидать, введение ММФ в полимер увеличивает теплопроводность композита и, соответственно, повышает температуру его размягчения (см. таблицу). Для определения температуры размягчения образец композита обычно медленно нагревают под действием небольшой нагрузки до заданного значения деформации, соответствующая ему температура и есть температура размягчения. Наиболее распространенным из методов определения температуры размягчения пластиков является метод Вика, который использован в настоящей работе. Теплостойкость по Вика оказалась выше для образцов ПЭ + ММФ с более крупными частицами ФН, что, по-видимому, объясняется более высокой теплоемкостью последних. С этим согласуется повышенная теплопроводность композита с размером частиц ФН 63–100 мкм, в сравнении с аналогичными образцами с дисперсностью частиц ММФ 160–200 мкм. Высокой теплопроводности способствует более плотная и равномерная упаковка в композите мелких теплопроводящих частиц ФН.

Эффективность поглощения и рассеяния энергии ЭМИ СВЧ диапазона композитными РПМ обеспечивается введением в полимерную матрицу ФН заданной дисперсности [1], [4], [8].

Определены электрофизические параметры композитных РПМ (см. таблицу). Результаты измерений электропроводности и тангенса угла диэлектрических потерь композитных материалов свидетельствуют, что они относятся к полупроводниковым материалам с электронным типом проводимости, т. е. их удельное сопротивление соответствует области  $10^{-4}$ – $10^{+10}$  Ом · см, характерной для полупроводников [9], [10]. Этого и следовало ожидать, зная электрофизические характеристики компонентов, составляющих композит. Полиэтилен – типичный диэлектрик. Его тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 50 Гц значительно ниже единицы (см. таблицу), также мала, но отлична от нуля электропроводность, удельное электрическое сопротивление достигает  $10^{15}$  Ом · см. Магнитно-мягкий марганец-цинковый феррит, являющийся одним из ФН РПМ, представляет собой магнитную керамику с незначительной электронной электропроводностью, вследствие чего его относят к электронным полупроводникам.

Электрофизические параметры композита не аддитивны параметрам компонентов, но всегда поддаются объяснению. Следует отметить, что некоторые электрофизические параметры зависят от внешних факторов, в частности, температуры и частоты ЭМИ. Так, тангенс угла диэлектрических потерь, являясь функцией от частоты, позволяет классифицировать один и тот же материал в одних случаях как проводник, в других – как диэлектрик (в зависимости от частоты). Это создает дополнительные сложности в прогнозировании свойств РПМ, но в то же время открывает новые перспективы в создании РПМ с управляемыми характеристиками.

#### Л и т е р а т у р а

1. Bannyi, V. A. Radioabsorbing composite materials based on thermoplastics: production technology and structural optimization principles / V. A. Bannyi, A. V. Makarevich, L. S. Pinchuk // Proc. of 33rd European Microwave Conference (EuMC2003). – Munich, Germany, 2003. – P. 1123–1126.
2. Bannyi, V. A. Physico-technological peculiarities of forming of radioabsorbing materials based on composite thermoplastics / V. A. Bannyi // Proceeding of 16<sup>th</sup> International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2006), 2<sup>nd</sup> Microwave & Radar Week in Poland, Krakow, 22–26 May 2006. – P. 1–3.

3. Ковнеристый, Ю. К. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения / Ю. К. Ковнеристый, И. Ю. Лазарева, А. А. Раваев. – М. : Наука, 1982. – 164 с.
4. Алексеев, А. Г. Композиционные ферромагнетики и электромагнитная безопасность / А. Г. Алексеев, О. М. Гусева, В. С. Семичев // НИИХ СПбГУ, 1998. – 296 с.
5. Банный, В. А. Радиопоглощающие материалы на основе наполненного полиэтилена / В. А. Банный, И. В. Царенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 3. – С. 3–6.
6. Полимерные волокнистые melt-blown материалы / В. А. Гольдаде [и др.]. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2000. – 260 с.
7. Радиопоглощающий материал для верхней одежды : пат. 7364 ВУ, МКП 7 А41D31/00, G21F3/02 / В. А. Банный, Л. С. Пинчук, А. В. Макаревич. – № a20011080 ; заявл. 19.12.2001 ; опубл. 30.06.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 3.
8. Банный, В. А. Модифицированные углеродным наполнителем радиопоглощающие композиционные материалы на основе полиэтилена / В. А. Банный, И. В. Царенко, С. И. Красюк // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Фил. ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под. общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 129–130.
9. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергия, 1969. – 408 с.
10. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Большая Рос. энцикл., 1994.

УДК 6217.014

### **МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ**

**М. Н. Верещагин<sup>2</sup>, М. Ю. Целуев<sup>2</sup>, С. Н. Целуева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Государственное научное учреждение «Институт механики  
металлополимерных систем имени В. А. Белого»  
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель*

Одной из распространенных технологических схем процесса лазерной обработки металлических деталей является лазерное «глазурирование» нанесенного тонкого слоя порошка на подложку [1], [5]. Взаимодействие лазерного излучения (ЛИ) с твердым телом обеспечивает возможность получения микрокристаллических и аморфных структур в тонких поверхностных слоях деталей [0]. Неравновесная структура образуется вследствие воздействия лазерного луча с высокой плотностью энергии на металл за короткий промежуток времени. При этом основная часть ЛИ идет на локальное расплавление малых объемов металла вблизи поверхности, тогда как основная масса детали остается «холодной». Наличие такого взаимодействия пары *расплав–деталь* позволяет фиксировать высокие скорости охлаждения около  $10^5$ – $10^7$  К/с. Импульсное плавление малых объемов металла на поверхности обеспечивает получение однородных жидкостей (расплавов), которые после кристаллизации могут фиксировать структуру жидкости с уникальными свойствами.