

УДК 537.874:678.742.2

## **РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НАПОЛНЕННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**

**В. А. БАННЫЙ**

*Государственное научное учреждение  
«Институт механики металлополимерных систем  
им. В. А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель*

**И. В. ЦАРЕНКО**

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

### **Введение**

Интенсивное развитие современной радио- и электронной техники, в частности, систем СВЧ, обострило проблему глобального электромагнитного загрязнения, которое отрицательно влияет на человека и препятствует эффективной работе радиотехнического оборудования. Не менее важными являются проблемы радиолокационной маскировки военных объектов, а также обеспечения электромагнитной безопасности стратегических объектов, например, систем управления АЭС от внешних электромагнитных излучений (ЭМИ) [1]–[3]. Радиопоглощающие материалы (РПМ) и электромагнитные экраны на их основе являются одним из средств решения этих проблем. Среди РПМ свою нишу занимают материалы на основе наполненного полиэтилена [4], [5]. Они привлекают технологичностью и малой удельной массой. Разработка высокоэффективных и дешевых РПМ, перерабатываемых в изделия с помощью высокопроизводительных технологий, остается актуальной научно-технической задачей. Так как полимерное связующее является радиопрозрачным, то для достижения требуемого коэффициента отражения электромагнитных волн (ЭМВ) и ослабления их энергии в заданном диапазоне частот при минимальных толщине слоя и массе РПМ необходимо осуществить поиск функциональных модификаторов связующего и оптимизировать состав и структуру композитов.

Цель работы – исследование радиопоглощающей способности термопластичных композиционных материалов, содержащих различные функциональные наполнители, и оптимизация состава и структуры РПМ.

### **Методика эксперимента**

Экспериментальные образцы РПМ изготавливали методом термического прессования из порошкообразных смесей полиэтилена высокого давления (ПЭ, ГОСТ 16803–070) и наполнителей – магнитно-мягкого феррита (ММФ, ТУ 6-09-5111–84, марка 2500 НМС, размер частиц 100–200 мкм), карбонильного железа (Fe, ТУ 6-09-300–78), никеля (Ni, ГОСТ 9722–78), меди (Cu, ГОСТ 4960–75), технического углерода, металлизированных стеклосфер (диаметр 200–500 мкм). Диаметр частиц Fe, Ni и Cu составлял 3–10 мкм. Степень наполнения варьировали от 25 до 75 мас. %. Также сформированы радиопоглощающие слоистые пластики, армированные электропроводящими тканями (Бусофит TP3/2).

Радиофизические параметры полимерных наполненных РПМ оценивали рефлектометрическим методом, используя измерители панорамные Р2 (рис. 1). Коэффициент отражения ( $R$ ) и ослабление ( $S$ ) энергии СВЧ-излучения регистрировали в диапазоне частот 2,0–27,0 ГГц при нормальном падении на образец ЭМВ.

Величину  $R$  измеряли путем анализа отраженного от поверхности РПМ СВЧ-сигнала. Для определения величины  $R$  анализировали электромагнитные параметры стоячей волны, образующейся в волноводе в результате интерференции нормально падающей на образец и отраженной ЭМВ [6], [7]. Коэффициент стоячей волны по напряжению ( $KСВ_n$ ) связан с модулем комплексного коэффициента отражения РПМ соотношением  $R (\%) = (KСВ_n - 1) \times 100 / (KСВ_n + 1)$ .

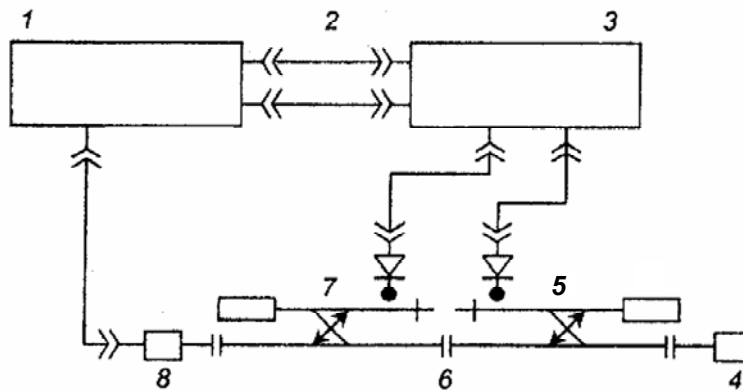


Рис. 1. Схема установки для измерения коэффициента отражения ( $R$ ) РПМ в волноводе при нормальном падении ЭМВ: 1 – генератор СВЧ; 2 – соединительные кабели; 3 – индикатор КСВ<sub>n</sub>; 4 – исследуемый образец; 5, 7 – детекторы отраженной и падающей волн; 6 – волновод; 8 – коаксиально-волноводный переход

Структуру композитных РПМ изучали с применением растровой электронной микроскопии (микроскоп LEO 982).

### Результаты и их обсуждение

Выявлены зависимости параметра  $R$  от степени наполнения РПМ функциональным наполнителем (рис. 2). При увеличении концентрации наполнителя (ответственного за электрические и магнитные потери) от 4 до 40–60 мас. % величина  $R$ , как правило, снижается. При дальнейшем повышении содержания наполнителя  $R$  возрастает [8]. Причина в том, что полимерные связующие композитных РПМ радиопрозрачны. После наполнения их ферромагнетиками при взаимодействии с излучением возрастают электрические и магнитные потери в материале и снижается коэффициент отражения РПМ. Однако дальнейший рост степени наполнения приводит к повышению  $R$  из-за рассогласования волновых сопротивлений экрана и атмосферы [1]. При высоком наполнении нарушается обязательное требование согласования волнового сопротивления РПМ (полевого импеданса для распространяющихся волн) с волновым сопротивлением пространства [1], [4], [6]. На границе раздела сред (импедансной поверхности) создаются условия, неблагоприятные для проникновения волны в глубь РПМ, поэтому отраженная составляющая ЭМВ увеличивается.

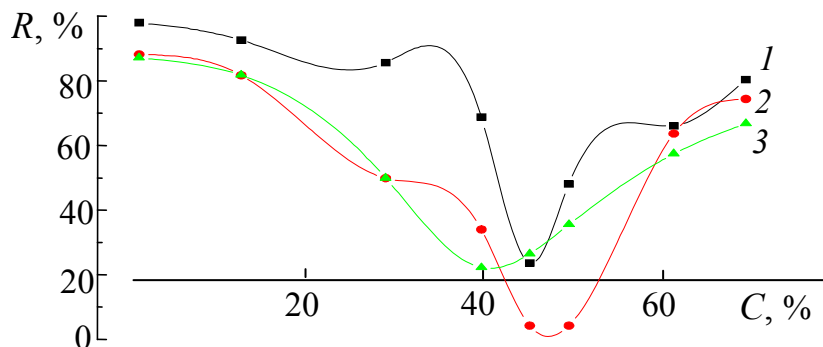


Рис. 2. Коэффициенты отражения ( $R$ ) нормально падающей плоской ЭМВ частотой 8 (1), 10 (2) и 12 (3) ГГц в зависимости от степени наполнения ( $C$ ) образцов РПМ толщиной 3 мм. Состав образцов – ПЭ + наполнитель Fe

Этого недостатка можно избежать, формируя материал градиентного типа, который задает плавное либо ступенчатое возрастание диэлектрических и магнитных потерь в направлении распространения ЭМВ при сведении к минимуму разностей диэлектрических и магнитных проницаемостей воздуха и поглотителя на границе раздела сред [9].

Одним из важнейших параметров РПМ является толщина ( $h$ ). От нее (при прочих равных условиях) в значительной мере зависят эксплуатационные характеристики РПМ. Однако это не значит, что следует стремиться к максимально возможной толщине радиопоглощающего слоя. Практика применения систем радиозащиты свидетельствует, что во многих случаях увеличение толщины и других геометрических размеров РПМ не приводит к улучшению их рабочих параметров.

Получены зависимости величины  $R$  от  $h$  образцов материалов при степени их наполнения, близкой к оптимальной (50 мас. %) (рис. 3).

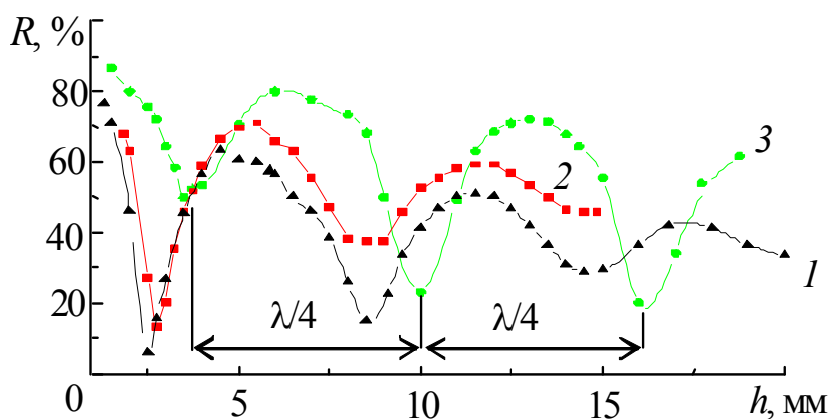


Рис. 3. Коэффициенты отражения ( $R$ ) нормально падающей плоской ЭМВ частотой 12 ГГц в зависимости от толщины ( $h$ ) образцов РПМ. Состав образцов – ПЭ + наполнитель (50 мас. %): 1 – Fe; 2 – ММФ; 3 – Ni

Кривые  $R-h$  имеют вид постепенно вырождающихся синусоид с периодом, равным  $\lambda/4$ . Положения минимумов коэффициента отражения РПМ на кривых  $R-h$  соответствуют (с точностью  $\pm 15\%$ ) значениям

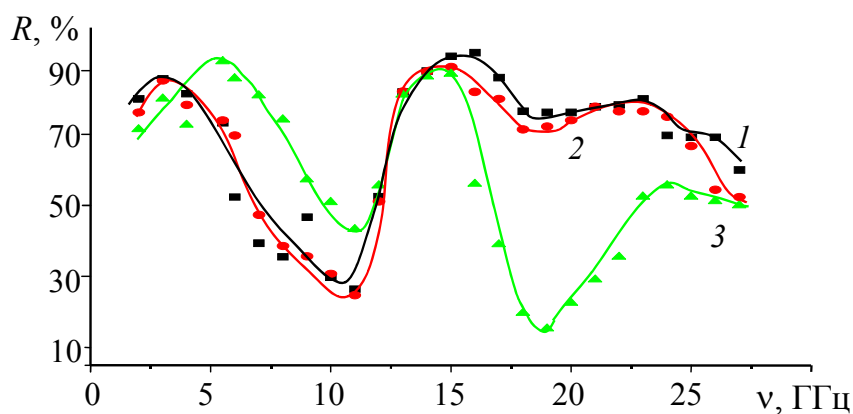
$$h = \lambda/K + z\lambda/4,$$

где  $K = 10$  – при наполнении ПЭ Fe или ММФ и  $K = 7,5$  – при наполнении Ni, а  $z$  – нуль или любое положительное число.

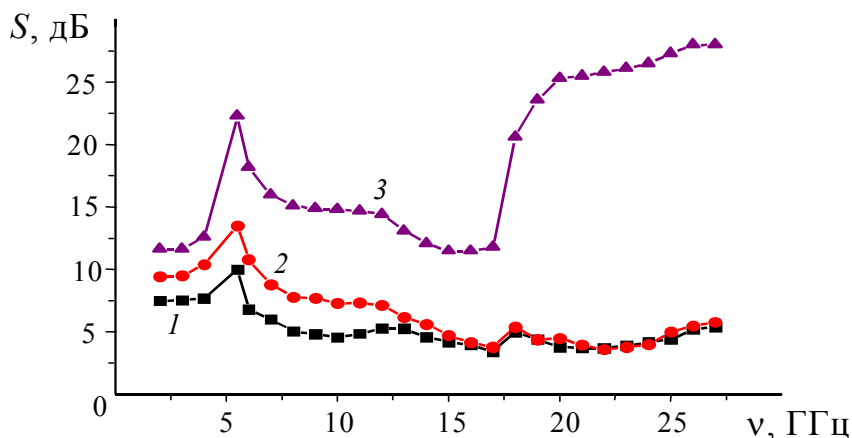
Таким образом, эффект интерференционного гашения энергии ЭМВ выражен наиболее ярко для образцов с низкими диэлектрическими и магнитными потерями. Тем не менее величина интерференционного рассеяния энергии ЭМВ убывает с увеличением толщины образцов (вырождение синусоид  $R-h$ ) и, по-видимому, будет пренебрежимо мала при значениях  $h \rightarrow \infty$ .

Изготовлены листовые и профильные монолитные широкополосные радиопоглотители на основе композиций термопластов с дисперсными функциональными наполнителями, которые обеспечивают высокий уровень магнитных, диэлектрических и джоулевых потерь при взаимодействии с СВЧ-излучением. Наряду с этим сформированы радиопоглощающие слоистые пластики, армированные электропроводящими тканями, а также полимерные композитные РПМ, наполненные волокнами и/или стеклосферами.

Частотные зависимости  $R$  и  $S$  для экспериментальных образцов РПМ, измеренные в волноводных линиях, представлены на рис. 4, а, б соответственно.



а)



б)

Рис. 4. Частотные зависимости: а – коэффициентов отражения ( $R$ ) и б – ослабления ( $S$ ) энергии нормально падающей плоской ЭМВ (в волноводе) для образцов РПМ толщиной  $h = 3$  мм. Состав образцов: 1 – ПЭ + ММФ (50 мас. %,  $d = 50-200$  мкм); 2 – ПЭ + ММФ (50 мас. %,  $d = 50-200$  мкм) + стеклосферы (10 мас. %,  $d = 200-500$  мкм); 3 – ПЭ + ММФ (50 мас. %,  $d = 50-200$  мкм) + углеродная ткань Бусофит ТР3/2

Видно, что замена части полимерного связующего стеклосферами и армирование композитного РПМ углеродной тканью улучшает параметры  $R$  и  $S$ . Это объясняется, во-первых, увеличением общего количества наполнителя, обеспечивающего магнитные, диэлектрические и джоулевы потери падающего на композит СВЧ-излучения (при соблюдении оптимизированной по критерию минимального отражения ЭМВ степени наполнения); во-вторых, сочетанием разных механизмов потерь и, наконец, улучшением условий рассеяния ЭМИ на структурных неоднородностях композита. Введение в полимерную композицию углеродных волокон разной длины и диаметра позволяет расширить полосу и увеличить коэффициент поглощения РПМ [10].

Структура термопрессованного образца РПМ, состоящего из ПЭ, наполненного ММФ и стеклосферами, была исследована методом РЭМ (рис. 5).

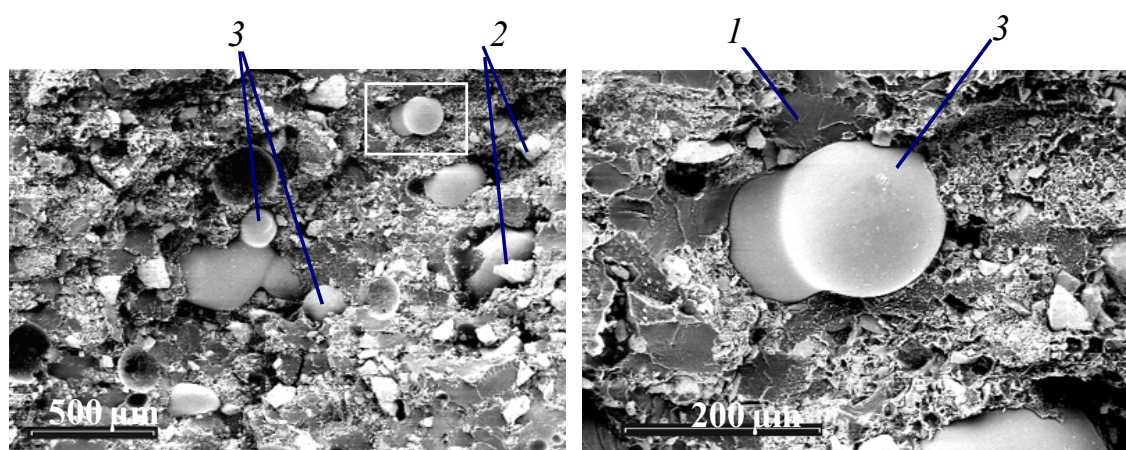


Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения композитного РПМ состава: ПЭ + ММФ ( $C = 50$  мас. %,  $d = 160\text{--}200$  мкм) + стеклосферы ( $C = 10$  мас. %,  $d = 200\text{--}500$  мкм); 1 – ПЭ; 2 – частицы ММФ; 3 – стеклосферы

Видно, что на границе раздела фаз стекло–полимер формируются зоны с пониженной плотностью связующего, а частицы магнитного наполнителя связаны в агрегаты и относительно равномерно распределены в связующем. Высоконаполненные кристаллизующиеся полимеры обычно обладают разрыхленной сферолитной структурой и содержат агрегаты из частиц наполнителя. Наполнители, размер которых велик по сравнению с диаметром ядра сферолита, не могут быть центрами сферолитообразования [11], [12], что и наблюдается в нашем случае. Однако на зародышеобразование может оказывать влияние сама поверхность частиц наполнителя.

### Заключение

Таким образом, для композитных РПМ на основе полиэтилена, содержащего различные функциональные дисперсные наполнители и армированного электропроводящими тканями, установлены оптимальные значения толщины образцов, степени наполнения, при которых ослабление энергии ЭМИ максимально. При рецептурной и структурной оптимизации композитов по критерию ослабления энергии ЭМИ наряду с высокими диэлектрическими и магнитными потерями следует обеспечивать согласование волновых сопротивлений РПМ и «свободного пространства», а также усиление эффекта рассеяния ЭМВ на межфазных границах внутри РПМ.

По технологическим и технико-экономическим критериям наиболее перспективными средствами радиозащиты являются РПМ на основе функционально наполненных термопластов. РПМ относятся к материалам двойного назначения и могут быть

использованы при создании малозаметных объектов, в том числе летательных аппаратов.

### Литература

1. Алексеев, А. Г. Композиционные ферромагнетики и электромагнитная безопасность / А. Г. Алексеев, О. М. Гусева, В. С. Семичев. – Санкт-Петербург : НИИХ СПбГУ, 1998. – 296 с.
2. Банный, В. А. Электромагнитная защита военнослужащих и радиолокационная маскировка военных объектов с использованием полимерных радиопоглощающих материалов / В. А. Банный // МІЛЕХ-2007 : материалы 3-й Междунар. науч. конф. по военно-техн. проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. – Минск, 2007. – С. 120–121.
3. Банный, В. А. Вопросы обеспечения электромагнитной безопасности АЭС / В. А. Банный // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Гомель, 2008. – Ч. 1. – С. 228–231.
4. Макаревич, А. В. Радиопоглощающие полимерные композиционные материалы в технике СВЧ / А. В. Макаревич, В. А. Банный // Материалы, технологии, инструменты. – 1999. – Т. 4, № 3. – С. 24–32.
5. Банный, В. А. Взаимодействие радиоволн СВЧ диапазона с полимерными гетерогенными системами и разработка электромагнитных экранов на основе полиэтилена : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.07 / В. А. Банный / ИММС им. В. А. Белого НАН Беларуси. – Гомель, 2005. – 132 с.
6. Ковнеристый, Ю. К. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения / Ю. К. Ковнеристый, И. Ю. Лазарева, А. А. Раваев. – Москва : Наука, 1982. – 164 с.
7. Стариков, В. Д. Методы измерения на СВЧ с применением измерительных линий / В. Д. Стариков. – Москва : Совет. радио, 1972. – 145 с.
8. Банный, В. А. Влияние размерных и рецептурных параметров полимерных композиционных материалов на их радиофизические характеристики / В. А. Банный, А. В. Макаревич, Л. С. Пинчук // Докл. АН Беларуси. – 2000. – Т. 44, № 4. – С. 109–111.
9. Методы анализа и расчета радиолокационных характеристик поглотителей электромагнитных волн, кромок и изломов поверхностей сложной геометрической формы / Б. В. Айзикович [и др.] // Зарубеж. радиоэлектроника. – 1994. – № 4–5. – С. 41–53.
10. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.] ; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск : БГУИР, 2000. – 284 с.
11. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. – Москва : Химия, 1968. – 536 с.
12. Липатов, Ю. С. Физическая химия наполненных полимеров / Ю. С. Липатов. – Москва : Химия, 1977. – 304 с.

Получено 06.02.2009 г.