



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-80-86>
УДК 621.318.1/ 621.315.5

Поступила 04.07.2024
Received 04.07.2024

РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ И ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М. В. ТУМИЛОВИЧ, Д. И. ПЕНЬЯЛОСА ОВАЛЬЕС, О. В. БОЙПРАВ,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Беларусь, ул. П. Бровки, 6. E-mail: tumilovich@bsuir.by

Разработаны радиопоглощающие композиционные материалы, покрытия и экраны на основе оксидов алюминия и железа для защиты СВЧ-устройств от электромагнитного излучения (ЭМИ). Установлены закономерности изменения характеристик отражения и передачи ЭМИ электромагнитных экранов на основе указанных порошкообразных оксидов. Показано, что применение композиционных материалов для экранов ЭМИ позволяет снизить на 2–10 дБ величину коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц и в СВЧ-диапазоне и улучшить эксплуатационные свойства существующих электромагнитных экранов для защиты приборов электронной техники, используемых для обработки информации ограниченного распространения, а также в системах архитектурного электромагнитного экранирования.

Ключевые слова. Композиционные материалы, электромагнитное излучение, экраны электромагнитного излучения, оксиды алюминия и железа.

Для цитирования. Тумилович, М. В. Радиопоглощающие композиционные материалы и покрытия на основе оксидов алюминия и железа для экранов электромагнитного излучения / М. В. Тумилович, Д. И. Пеньялоса Овальес, О. В. Бойправ // Литье и металлургия. 2024. № 3. С. 80–86. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-80-86>.

RADIO-ABSORBING COMPOSITE MATERIALS AND COATINGS BASED ON ALUMINUM AND IRON OXIDES FOR ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDING

M. V. TUMILOVICH, D. I. PEÑALOSA OVALLE, O. V. BOIPRAV, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus, 6, Brovki str. E-mail: tumilovich@bsuir.by

Radio-absorbing composite materials, coatings and shields based on aluminum and iron oxides have been developed for protection of microwave devices from electromagnetic radiation (EMR). The patterns of changes in the characteristics of EMR reflection and transmission of electromagnetic shields based on the said powder-like oxides have been established. It has been shown that the use of these composite materials for EMR shields can reduce the EMR reflection coefficient by 2–10 dB in the frequency range of 0.7–17.0 GHz and in the microwave range, and improve the operational properties of existing electromagnetic shields for the protection of electronic devices used for processing of limited distribution information, as well as in architectural electromagnetic shielding systems.

Keywords. Composite materials, electromagnetic radiation, electromagnetic radiation shields, aluminum and iron oxides.

For citation. Tumilovich M. V., Peñalosa Ovalle D. I., Boiprav O. V. Radio-absorbing composite materials and coatings based on aluminum and iron oxides for electromagnetic radiation shielding. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 3, pp. 80–86. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-80-86>.

Введение

Создание радиопоглощающих материалов, покрытий и изделий на их основе, эффективно ослабляющих и поглощающих электромагнитные излучения (ЭМИ) в широком от СВЧ (10^9 – $5 \cdot 10^{11}$ Гц) до ИК ($0,75 \cdot 10^{-6}$ – 10^{-3} м) диапазоне (электромагнитных экранов), предназначенных для защиты приборов электронной техники от электромагнитного излучения, является важной и актуальной научной задачей. Экраны ЭМИ находят все большее применение для обеспечения экологической безопасности жизнедеятельности человека в космической сфере, радиоэлектронике, физико-технических и специализированных системах обеспечения информационной безопасности, а также в электромагнитной совместимости

в системах различного назначения. В рамках решения этой задачи перспективными объектами таких исследований представляются порошкообразные оксиды природного происхождения на основе алюминия и железа в связи с тем, что такие материалы являются природными минералами и характеризуются невысокой стоимостью [1].

Цель настоящей работы – разработка радиопоглощающих композиционных материалов, покрытий и экранов на основе порошкообразных оксидов алюминия и железа для защиты СВЧ-устройств от электромагнитного излучения.

Методы исследований

Определение коэффициентов передачи и отражения электромагнитных экранов в диапазоне частот 0,7–17 ГГц проводили с помощью панорамного измерителя коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18 (производитель – Центр 1.9 НИЧ БГУИР), работающего по принципу раздельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отраженной волн, и состоящего из генератора качающейся частоты (блок ГКЧ), блока обработки измерительных сигналов, передающей и приемной рупорных антенн Пб-23М, блоков направленных ответвителей (блоки В и А/Р), соединенных с каналами блока обработки измерительных сигналов и антеннами.

На основе результатов измерений ослабления ЭМИ (A) и коэффициента стоячей волны ($KCBH$) образцов выполняли расчеты коэффициентов передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}):

$$S_{21} = -A, \text{ дБ},$$
$$S_{11} = 20 \log \left(\frac{KCBH - 1}{KCBH + 1} \right), \text{ дБ}.$$

Результаты и их обсуждение

Для создания композиционных материалов выбраны следующие материалы: порошкообразные алюмооксиды (электрокорунд и глинозем) и порошкообразный оксид железа (гематит Fe_2O_3). Это связано с диэлектрическими свойствами порошкообразных алюмооксидов, что обусловлено большим процентным содержанием в их составе $\alpha-Al_2O_3$ (до 93–96 мас. %). Состав глинозема близок к составу электрокорунда, однако по сравнению с ним имеет более низкую стоимость и более широко распространен, так как является природным минералом (составная часть глин). Кроме того, данные материалы способны работать в условиях повышенных температур, что имеет важное значение при создании электромагнитных экранов. Оксиды железа обладают ферромагнитными свойствами и являются материалом природного происхождения с низкой стоимостью.

Измерения характеристик ослабления и отражения ЭМИ проводили в диапазоне частот 0,7–17 ГГц. Зависимости коэффициентов передачи и отражения от частоты для образцов из порошкообразного электрокорунда, а также содержащих в составе воду показаны на рис. 1.

Из рисунка видно, что коэффициент передачи остается неизменным в диапазоне 0,7–11,41 ГГц. Превышение этого диапазона приводит к существенному увеличению коэффициента передачи в образцах, не содержащих воду, по отношению к образцам, содержащим воду. В диапазоне 0,7–2,0 ГГц коэффициент отражения изменяется до $-5,0$ дБ, а в диапазоне 2–17 ГГц – до $-7,8$ дБ. Наиболее эффективным является добавление воды к порошкообразному электрокорунду, что снижает коэффициент отражения в диапазоне частот 5,9–9,4 ГГц. Такие характеристики материала представляются перспективными для его применения в качестве основного компонента поверхностного или согласующего слоя многослойных электромагнитных экранов.

Экспериментально исследована возможность получения на основе порошкового глинозема трудно-воспламеняемого композиционного покрытия, предназначенного для снижения значений коэффициента отражения ЭМИ экранов, содержащих проводящие материалы. Установлено оптимальное объемное соотношение порошкообразного глинозема (наполнителя) и водоземлюльсионного состава (связующего вещества) для получения композиционного покрытия, составляющее 4:6. Композиционное покрытие получали путем механического смешивания в установленном оптимальном объемном соотношении порошкообразного глинозема и водоземлюльсионного состава.

С использованием композиционного покрытия изготовлены экспериментальные образцы электромагнитных экранов двух видов. Образцы вида 1 представляли собой двухслойные конструкции: целлюлозные пластины толщиной 2 ± 1 мм, на поверхность которых слоем толщиной 3 ± 1 мм наносили

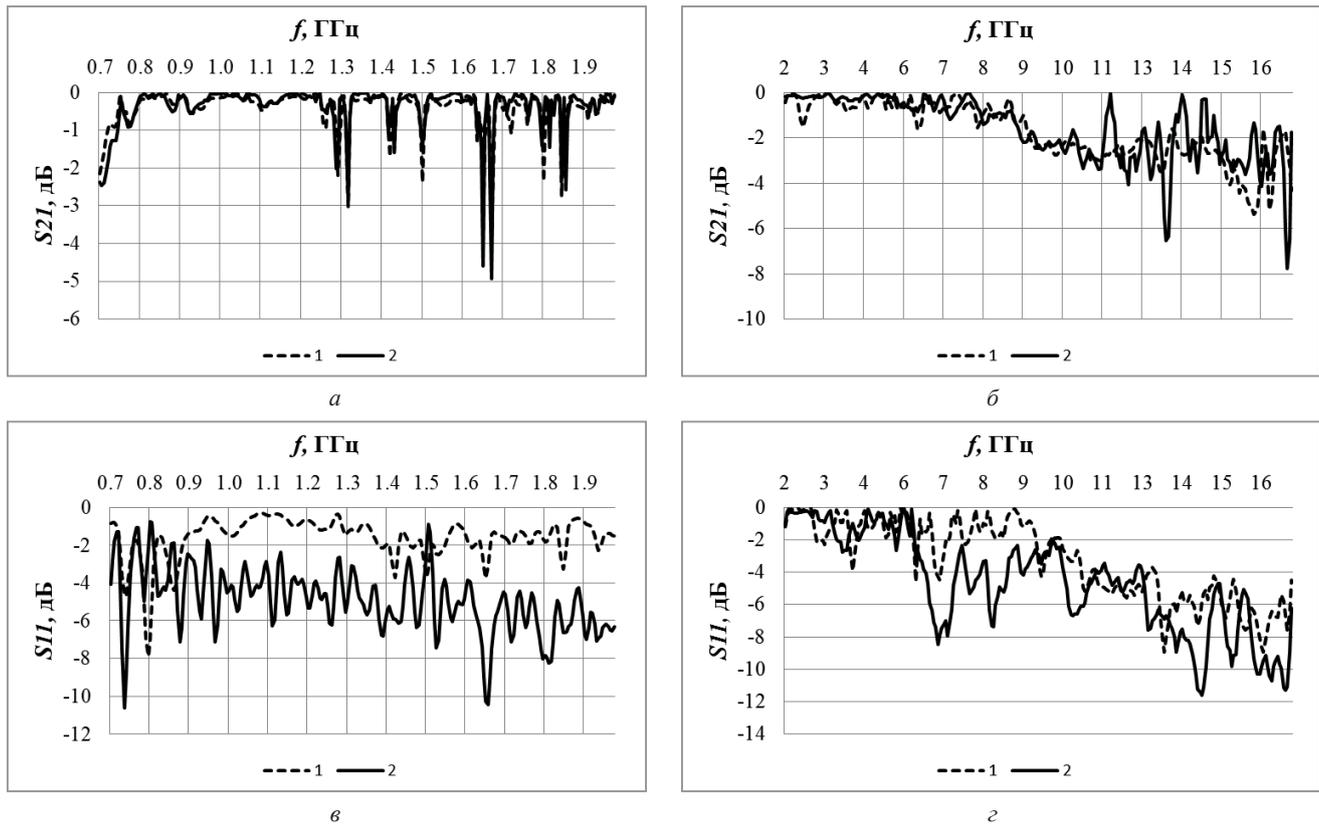


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициентов передачи (*a*, *б*) и отражения (*в*, *г*) порошкообразного электрокорунда в диапазонах 0,7–2 ГГц (*a*, *в*) и 2–17 ГГц (*б*, *г*): 1 – образцы, не содержащие воду, 2 – образцы, содержащие воду

полученное композиционное покрытие. Образцы вида 2 представляли собой трехслойные конструкции: целлюлозные пластины толщиной 2 ± 1 мм, на одну из сторон которых слоем толщиной 3 ± 1 мм нанесено полученное композиционное покрытие, а на другой из сторон зафиксирована металлизированная полимерная пленка толщиной 20 мкм. Величины толщины целлюлозных пластин и толщины слоя нанесенного композиционного покрытия определяли с помощью микрометра МК-25 (ГОСТ 6507–90).

На изготовленных образцах вида 1 (рис. 2) и вида 2 (рис. 3) выполняли измерения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц.

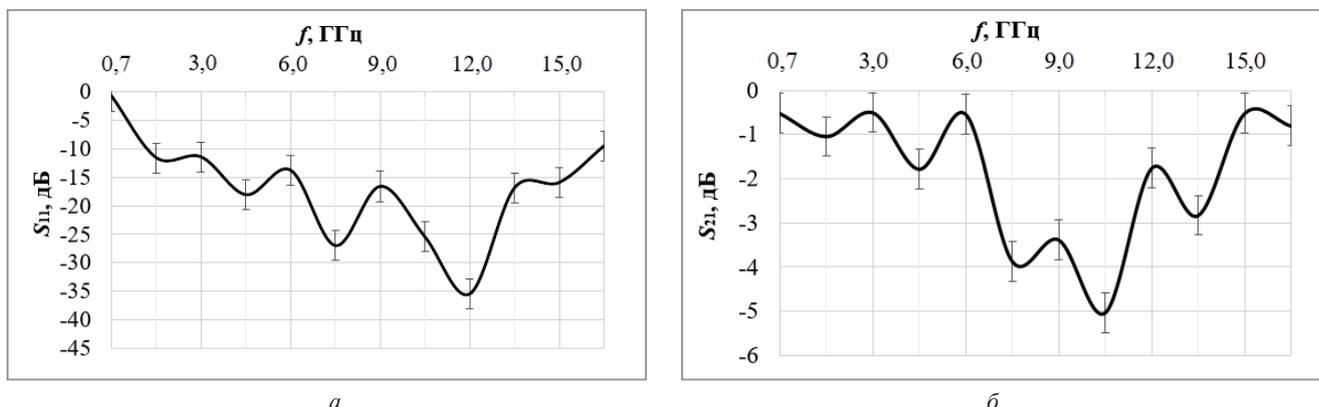


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения (*a*) и передачи (*б*) ЭМИ в диапазоне 0,7–17,0 ГГц (*б*) образцов вида 1

Из рис. 2 видно, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц экспериментальных образцов вида 1 изменяются в пределах от $-1,0$ до $-35,0$ и от $-0,5$ до $-5,0$ дБ, поэтому можно сделать заключение, что полученное композиционное покрытие обеспечивает ослабление в 1,1–3,2 раза мощности ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц при условии, что толщина этого покрытия составляет 3 ± 1 мм. Высокое значение коэффициента передачи и низкое значение коэффициента отражения

ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц экспериментальных образцов вида 1 связано с отсутствием в их составе компонентов, характеризующихся свойством электропроводности.

На рис. 3 представлена частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–17,0 ГГц экспериментальных образцов вида 2. Из рисунка видно, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц экспериментальных образцов вида 2 изменяются в пределах от –1,0 до –33,0 дБ. Величины рассматриваемого параметра в диапазоне частот 1,0–17,0 ГГц составляют менее –10,0 дБ. Анализируемая зависимость может быть условно разделена на три резонансные кривые, каждая из которых является несимметричной относительно условной линии, проходящей параллельно оси ординат через точку, обозначающую на оси абсцисс значение ее резонансной частоты. Первая из таких кривых характеризуется диапазоном частот 0,7–3,0 ГГц и значением резонансной частоты 2,0 ГГц, вторая – диапазоном частот 3,0–7,0 ГГц и значением резонансной частоты 6,0 ГГц, третья – диапазоном частот 7,0–13,0 ГГц и значением резонансной частоты 11,5 ГГц. Значения коэффициента отражения ЭМИ на резонансных частотах соответственно составляют –11,0, –33,0 и –18,0 дБ. На основании этого можно сделать заключение, что наибольшая разность фаз электромагнитных волн, падающих на поверхность рассматриваемых экспериментальных образцов, и волн, отражаемых их поверхностью и поверхностью входящей в их состав металлизированной полимерной пленки, наблюдается в том случае, если значение частоты этих волн лежит в пределе 6,0–7,5 ГГц. Указать более точное значение частоты не представляется возможным, так как измерения значений коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц проводили с шагом 1,5 ГГц.

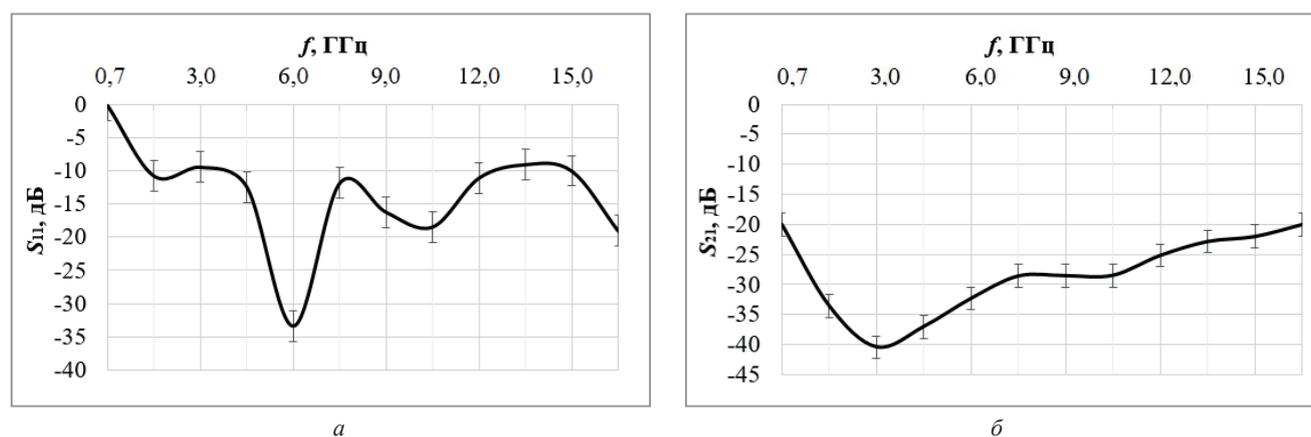


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента отражения (а) и передачи (б) ЭМИ в диапазоне 0,7–17,0 ГГц (б) образцов вида 2

Так как значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 1,0–17,0 дБ исследованных экспериментальных образцов вида 2 составляют менее –10,0 дБ при значениях коэффициента передачи ЭМИ от –20,0 до –40,0 дБ, то можно сделать вывод о том, что полученное композиционное покрытие на основе глинозема и водоземлюсионного состава представляется перспективным для изготовления поверхностного слоя для радиопоглощающих конструкций. Ввиду того что данное покрытие является негорючим, то радиопоглощающие конструкции с поверхностным слоем на основе глинозема могут применяться для облицовки стен помещений, в которых располагаются приборы электронной техники.

Дальнейшим развитием проведенных исследований явилась разработка способа улучшения экранирующих и радиопоглощающих свойств композиционных покрытий, содержащих порошкообразный электрокорунд и глинозем. Способ основан на модификации состава таких покрытий путем добавления в него порошкообразных материалов, характеризующихся магнитными свойствами (в частности, порошкообразного оксида железа [2, 3]).

В процессе выполнения исследований установлено оптимальное объемное соотношение порошкообразного электрокорунда, порошкообразного оксида железа и связующего вещества (водоземлюсионная краска, водный щелочной раствор силиката натрия или гипсовый раствор) в изготавливаемом композиционном покрытии, составляющее 3,0:2,0:5,0 объемных частей. При этом содержание порошкообразного алюминияоксида в составе такого покрытия должно превышать содержание порошкообразного оксида железа.

В соответствии с разработанным способом были проведены исследования экспериментальных образцов композиционных покрытий шести видов:

- композиционное покрытие на основе порошкообразных электрокорунда, оксида железа и водного щелочного раствора силиката натрия, нанесенное на целлюлозную подложку слоем толщиной 3,0 мм (образец 1);
- композиционное покрытие на основе порошкообразных электрокорунда, оксида железа и водного щелочного раствора силиката натрия, нанесенное на металлическую подложку слоем толщиной 3,0 мм (образец 2).
- композиционное покрытие на основе порошкообразного электрокорунда и водного щелочного раствора силиката натрия, нанесенное на целлюлозную подложку слоем толщиной 3,0 мм (образец 3);
- композиционное покрытие на основе порошкообразного электрокорунда и водного щелочного раствора силиката натрия, нанесенное на металлическую подложку слоем толщиной 3,0 мм (образец 4);
- композиционное покрытие на основе порошкообразного оксида железа и водного щелочного раствора силиката натрия, нанесенное на целлюлозную подложку слоем толщиной 3,0 мм (образец 5);
- композиционное покрытие на основе порошкообразного оксида железа и водного щелочного раствора силиката натрия, нанесенное на металлическую подложку слоем толщиной 3,0 мм (образец 6).

На указанных образцах проведены измерения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц и выполнен сравнительный анализ полученных характеристик.

На рис. 4, 5 приведены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–17,0 ГГц изготовленных образцов 1, 3 и 5.

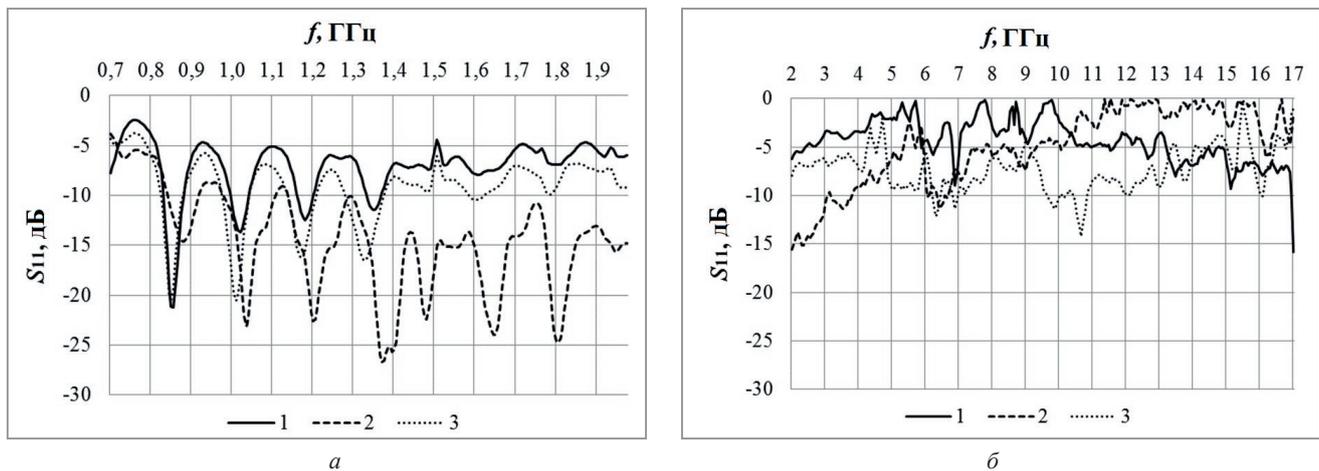


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2,0–17,0 ГГц (б) образцов 1 (кривая 1), образцов 3 (кривая 2) и образцов 5 (кривая 3)

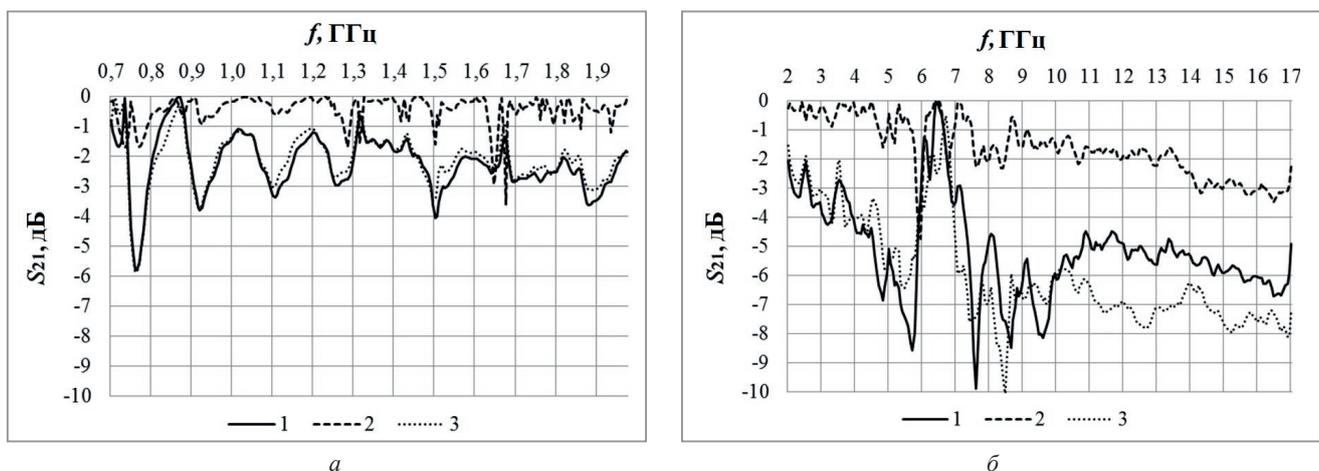


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2,0–17,0 ГГц (б) образцов 1 (кривая 1), образцов 3 (кривая 2) и образцов 5 (кривая 3)

Сравнение характеристик, приведенных на рис. 4, 5, показало следующее. В результате добавления порошкообразного оксида железа в состав композиционного покрытия, наполнителем которого является

порошкообразный электрокорунд, можно обеспечить снижение на 1,0–8,0 дБ значений коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц такого покрытия, что обусловлено увеличением на 1,0–15,0 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ [4]. Увеличение значений коэффициента отражения ЭМИ композиционного покрытия на основе порошкообразного электрокорунда в результате добавления в состав такого покрытия порошкообразного оксида железа связано с увеличением его волнового сопротивления в связи с тем, что относительная магнитная проницаемость порошкообразного оксида железа больше 1 [2, 3].

В диапазонах частот 0,7–14,0 и 16,0–16,5 ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ композиционного покрытия, наполнителем которого является смесь порошкообразных алюмооксида и оксида железа, на 1,0–8,0 дБ превышают значения коэффициента отражения ЭМИ композиционного покрытия, наполнителем которого является порошкообразный оксид железа. Это может быть обусловлено тем, что энергия электромагнитных волн, рассеиваемых частицами смеси порошкообразных алюмооксида и оксида железа, превышает энергию электромагнитных волн, рассеиваемых частицами порошкообразного оксида железа, так как размер частиц порошкообразного алюмооксида больше, чем размер частиц порошкообразного оксида железа [5, с. 123].

Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–17,0 ГГц образцов 2, 4 и 6 представлены на рис. 6.

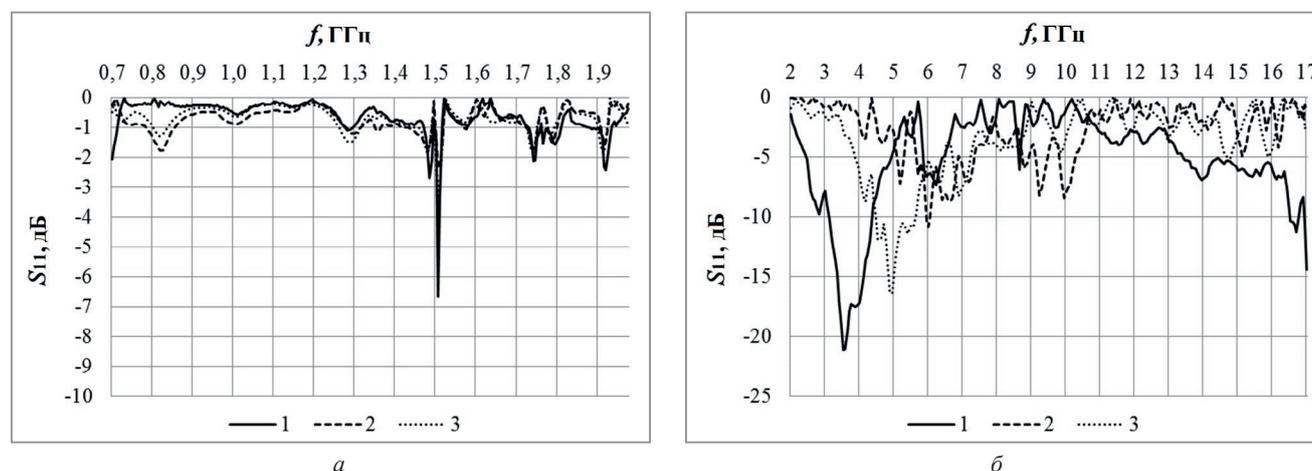


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2,0–17,0 ГГц (б) образцов 2 (кривая 1), образцов 4 (кривая 2) и образцов 6 (кривая 3)

На основе результатов сравнения приведенных на рис. 6 характеристик установлено следующее. Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазонах частот 0,7–1,5, 1,52–2,0 ГГц нанесенного на металлическую подложку композиционного покрытия, наполнителем которого является порошкообразный алюмооксид, практически схожи со значениями аналогичного параметра, характерного для нанесенного на металлическую подложку композиционного покрытия, наполнителем которого является смесь порошкообразных алюмооксида и оксида железа или порошкообразный оксид железа. Это можно связать с тем, что в указанном диапазоне частот коэффициент отражения ЭМИ определяется в большей степени амплитудой электромагнитных волн, отраженных от границы раздела «композиционное покрытие – металлическая подложка», чем амплитудой электромагнитных волн, отраженных от границы раздела «воздух – композиционное покрытие».

При добавлении порошкообразного оксида железа в состав нанесенного на металлическую подложку композиционного покрытия, наполнителем которого является порошкообразный электрокорунд, можно обеспечить снижение на 2,0–20,0 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ на частоте 1,5 ГГц и в диапазонах частот 2,0–5,0, 11,0–17,0 ГГц (при условии, что такое покрытие нанесено на металлическую подложку). Указанный эффект, зарегистрированный на частоте 1,51 ГГц и в диапазоне частот 2,0–5,0 ГГц, может быть обусловлен явлением естественного ферромагнитного резонанса, связанного с магнитными свойствами порошкообразного оксида железа, а эффект, зарегистрированный в диапазоне частот 11,0–17,0 ГГц, – явлением взаимодействия в противофазе электромагнитных волн, отраженных от границы раздела «воздух – композиционное покрытие», и электромагнитных волн, отраженных от границы раздела «композиционное покрытие – металлическая подложка». Следует отметить, что

относительно ЭМИ диапазона частот 3,0–4,0 ГГц нанесенное на металлическую подложку композиционное покрытие, наполнителем которого является смесь порошкообразных алюмооксида и оксида железа, характеризуется радиопоглощающими свойствами, так как значение его коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот равно или менее –10,0 дБ.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований разработаны радиопоглощающие композиционные материалы, покрытия и экраны на основе оксидов алюминия и железа для защиты СВЧ-устройств от электромагнитного излучения (ЭМИ). Установлены закономерности изменения характеристик отражения и передачи ЭМИ электромагнитных экранов на основе указанных порошкообразных оксидов. Показано, что путем добавления 20,0 об.% порошкообразного оксида железа в состав композиционного покрытия, наполнителем которого является порошкообразный электрокорунд, можно обеспечить улучшение их экранирующих свойств в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц и радиопоглощающих свойств в диапазонах частот 2,0–5,0, 11,0–17,0 ГГц. При этом стоимость 1 кг оксида железа сопоставима со стоимостью 1 кг порошкообразного электрокорунда, т. е. использование предложенного способа не будет приводить к увеличению себестоимости композиционного покрытия на основе порошкообразных алюмооксидов. В результате реализации предложенного способа можно обеспечить снижение на 2,0–20,0 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот рассматриваемых композиционных покрытий при условии, если такие покрытия нанесены на металлические подложки; радиопоглощающие свойства для рассматриваемых композиционных покрытий в диапазоне частот 2,5–5,0 ГГц. Композиционные покрытия, наполнителем которых является смесь порошкообразного электрокорунда и оксида железа, могут быть использованы в процессе изготовления или усовершенствования технических и эксплуатационных свойств конструкций электромагнитных экранов, предназначенных для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новые технологии создания экранов электромагнитного излучения на основе модифицированных порошковых, наноструктурированных и пленочных материалов / Л. М. Лыньков [и др.] // Доклады БГУИР. – 2019. – № 2. – С. 85–99.
2. Структура и магнитные свойства нанопорошков оксидов железа и гибридных нанопорошков типа «ядро – оболочка» на их основе / И. С. Гребенников [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2018. – Т. 82. – № 9. – С. 1343–1354.
3. Модифицирование оксида железа оксипропилированными ПАВ / Г. С. Матросова [и др.] // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т. 10, вып. 1. – С. 93–102.
4. Мишин, Д. Д. Магнитные материалы / Д. Д. Мишин. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
5. Алексеев, А. Г. Физические основы технологии Stealth / А. Г. Алексеев, Е. А. Штагер, С. В. Козырев. – СПб.: ВММ, 2007. – 284 с.

REFERENCES

1. Lynkou L. M., Bogush V. A., Borbot'ko T. V., Nasonova N. V., Belousova E. S., Boiprav O. V. Novye tekhnologii sozdaniya ekranov elektromagnitnogo izlucheniya na osnove modifitsirovannykh poroshkovykh, nanostrukturirovannykh i plenochnykh materialov [New technologies for creation of electromagnetic radiation shields based on modified powder, nanostructured and film materials]. *Doklady BGUIR = BSUIR Reports*, 2019, no. 2, pp. 85–99.
2. Grebennikov I. S., Savchenko A. G., Zaytseva M. P., Muradova A. G., Yurtov E. V. Struktura i magnitnye svoystva nanoporoshkov oksidov zheleza i gibridnykh nanoporoshkov tipa «yadro – obolochka» na ih osnove [Structure and magnetic properties of nanopowders of iron oxides and hybrid nanopowders of the core–shell type based on them]. *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Seriya fizicheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2018, iss. 82, no. 9, pp. 1222–1231.
3. Matrosova G. S., Bobkov A. A., Sosnina S. A., Polunina I. A. Modifitsirovanie oksida zheleza oksipropilirovannyimi PAV [Modification of iron oxide with ethoxylated surfactants]. *Sorbtsionnye i hromatograficheskie processy = Sorption and chromatographic processes*, 2010, iss. 10, no. 1, pp. 93–102.
4. Mishin D. D. *Magnitnye materialy* [Magnetic materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991, 384 p.
5. Alekseev A. G., Shtager E. A., Kozыrev S. V. *Fizicheskie osnovy tekhnologii Stealth* [Physical foundations of Stealth technology]. Saint Petersburg, BMM Publ., 2007, 284 p.