

**О.В. Бойправ, Д.И. Пеньялоса Овальес,
М.В. Тумилович, Л.М. Лыньков**

СПОСОБ МОДИФИКАЦИИ СОСТАВА НЕГОРЮЧИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВЫХ АЛЮМООКСИДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

Аннотация

Описан способ модификации состава негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов (электрокорунд, глинозем) для электромагнитных экранов в целях улучшения радиопоглощающих и радиоэкранирующих свойств таких покрытий. Показано, что при использовании этого способа можно обеспечить снижение на 1,0...6,0 дБ значений коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазонах частот 0,9...4,0 и 11,0...17,0 ГГц указанных покрытий (при условии, что они нанесены на металлические подложки) и на 4,0...12,0 дБ значений их коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц (при условии, что они нанесены на целлюлозные подложки). Установлено, что композиционные покрытия на основе порошковых алюмооксидов для электромагнитных экранов, состав которых модифицирован в соответствии с предложенным способом, являются негорючими. Экспериментально подтверждено, что в результате термообработки таких покрытий можно обеспечить снижение на 2,0...15,0 дБ значений их коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 1,2...6,0 ГГц (при условии, что они нанесены на металлические подложки).

Ключевые слова: алюмооксид, глинозем, композиционный материал, коэффициент отражения, коэффициент передачи, электрокорунд, электромагнитное излучение.

Введение

В работе [1] представлены результаты экспериментального обоснования эффективности использования композиционного покрытия на основе порошкового электрокорунда в качестве поверхностного (согласующего) слоя электромагнитных экранов, характеризующихся проводящими свойствами (например, металлических пластин, применяемых для электромагнитного экранирования помещений; тканей, содержащих углеродные волокна и применяемых для обшивки внутренних перегородок помещений с целью придания этим перегородкам экранирующих свойств, и т. п.). В [1] показано, что данное покрытие не только обеспечивает снижение значений коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц указанных экранов, но и обуславливает их свой-

ство негорючести ввиду того, что само характеризуется таким свойством, связанным с тем, что в состав содержащегося в этом покрытии порошкового электрокорунда входит до 96,0 % об. оксида алюминия, являющегося неорганическим антипереном.

В работе [2] представлены результаты экспериментального обоснования возможности использования в качестве наполнителя для рассматриваемого покрытия порошкового глинозема вместо порошкового электрокорунда. Преимущество порошкового глинозема по сравнению с порошковым электрокорундом заключается в том, что он характеризуется более низкой стоимостью. При этом он так же, как и электрокорунд, является негорючим материалом и содержит более 90,0 % об. оксида алюминия.

В настоящей статье представлены результаты исследований, которые стали первым этапом цик-

ла исследований, направленных на экспериментальное обоснование способов модификации состава негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмосиликатов (электрокорунд, глинозем) для улучшения их радиозащитных и радиопоглощающих свойств. Объектом исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, были указанные покрытия, характеризующиеся составом, модифицированным посредством проводящих компонентов. Выбор таких компонентов для модификации состава негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмосиликатов обусловлен тем, что материалы, содержащие такие компоненты, характеризуются радиозащитными свойствами и в связи с этим низкими значениями коэффициента передачи электромагнитного излучения, что обосновано в работах [3]-[5].

В ходе выполнения исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, были решены следующие задачи:

- 1) выбор и теоретическое обоснование проводящих компонентов для добавления в состав негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов в целях его модификации и улучшения за счет этого радиозащитных и радиопоглощающих свойств таких покрытий;
- 2) разработка способа модификации состава негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов, основанного на использовании выбранных проводящих компонентов;
- 3) изготовление экспериментальных образцов, содержащих негорючее композиционное покрытие на основе порошкового алюмооксида, и экспериментальных образцов, содержащих аналогичное покрытие, состав которого модифицирован в соответствии с разработанным способом;
- 4) определение класса горючести композиционного покрытия на основе порошкового алюмооксида, состав которого модифицирован в соответствии с разработанным способом;
- 5) измерение и сравнительный анализ значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения изготовленных экспериментальных образцов (в том числе образцов, которые были использованы при определении

класса горючести композиционного покрытия на основе порошкового алюмооксида, состав которого модифицирован в соответствии с разработанным способом).

Методика проведения эксперимента

В качестве проводящих компонентов для добавления в состав негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов с целью его модификации предложено использовать фрагменты изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки прямоугольной формы. По сравнению с проводящими порошками и волокнами, широко используемыми в настоящее время для изготовления композиционных радиопоглощающих и радиозащитных материалов [3]-[5], такие фрагменты характеризуются низкой массой, обусловленной малыми толщиной (~ 200 мкм) и плотностью (~ 800 кг/м³) изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки. Толщина слоя металла на поверхности этой пленки ~ 20 мкм. В работе [6] представлено экспериментальное обоснование возможности получения на основе фрагментов изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки прямоугольной формы как радиозащитных, так и радиопоглощающих материалов, характеризующихся значениями коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц, изменяющимися в пределах от -20,0 до -40,0 дБ. Радиопоглощающие свойства материалов на основе указанных фрагментов обусловлены потерями энергии взаимодействующих с этими материалами электромагнитных волн, связанными с тем, что эти фрагменты являются по своей сути четвертьволновыми антеннами.

Установлено, что значения длины фрагментов изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки прямоугольной формы, предназначенных для добавления в состав негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов, должны лежать в диапазоне от $(0,5 \pm 0,1)$ до $(10,0 \pm 0,1)$ см. Правая граница указанного диапазона соответствует значению четверти длины электромагнитной волны, частота которой совпадает с нижним пределом рабочего диапазона частот негорючих композиционных

покрытий на основе порошковых алюмооксидов (0,7 ГГц), левая граница – значению четверти длины электромагнитной волны, частота которой совпадает с верхним пределом рабочего диапазона частот этих покрытий (17,0 ГГц). Иными словами, если значения длины фрагментов изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки прямоугольной формы, предназначенных для добавления в состав негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов, лежат в указанном диапазоне, то эти фрагменты будут являться аналогами четвертьволновых антенн для электромагнитных волн, частоты которых лежат в пределах рабочего диапазона частот этих покрытий. Значение ширины указанных фрагментов должно составлять $(0,5 \pm 0,1)$ см.

Разработанный авторами способ модификации состава негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов, основанный на использовании выбранных проводящих компонентов, включает в себя нижеследующие шаги.

1. Раскрой изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки на фрагменты требуемых размеров. Для планирования и оптимизации такого раскроя можно использовать специальное программное обеспечение. Раскрой должен быть спланирован таким образом, чтобы в результате его реализации было получено как минимум 11 видов фрагментов, отличающихся длиной [длина фрагментов первого вида – $(0,5 \pm 0,1)$ см, второго вида – $(1,0 \pm 0,1)$ см, третьего вида – $(2,0 \pm 0,1)$ см и т. п.].

2. Смешивание лабораторным миксером порошкового алюмооксида (электрокорунд, глинозем) и негорючего связующего вещества (водоэмульсионный состав, водный щелочной раствор силикатов натрия, калия или алюмофосфатов [7, с. 177]) в оптимальном объемном соотношении, которое должно быть установлено в соответствии с методикой, представленной в работе [1].

3. Формирование композиционного покрытия путем нанесения шпателем полученной смеси на поверхность электромагнитного экрана слоем толщиной $(0,3 \pm 0,1)$ мм. Толщину слоя нанесенной смеси необходимо контролировать микрометром типа МК-25, изготовленным согласно ГОСТ 6507–90.

4. Модификация состава композиционного покрытия, сформированного на этапе 3, путем равномерного распределения вручную по его поверхности полученных фрагментов изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки. Распределение фрагментов необходимо реализовывать при соблюдении трех условий.

Условие 1. В группу фрагментов изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки, подлежащих распределению по поверхности покрытия, должны входить фрагменты каждого из видов, причем количество фрагментов определенного вида должно совпадать с количеством фрагментов любого другого вида.

Условие 2. Количество распределенных фрагментов должно быть таким, чтобы их суммарная площадь не превышала 10,0 % от площади поверхности покрытия. Экспериментально определено, что увеличение суммарной площади поверхности указанных фрагментов приводит к увеличению значений коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц покрытия на основе смеси порошкового алюмооксида и негорючего связующего вещества, по поверхности которого распределены эти фрагменты, и, как следствие, к увеличению значений коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц электромагнитного экрана, на поверхности которого оно сформировано.

Условие 3. Распределение должно быть реализовано в течение промежутка времени, эквивалентного продолжительности высыхания покрытия или не превышающего ее. Соблюдение этого условия будет способствовать фиксированию на поверхности покрытия фрагментов распределенной по ней изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки.

5. Сушка при стандартных условиях [8] композиционного покрытия (в случае, если распределение фрагментов изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки по поверхности покрытия было реализовано в течение промежутка времени, меньшего, чем продолжительности его высыхания).

6. Нанесение шпателем негорючего связующего вещества (водоэмульсионный состав, водный щелочной раствор силикатов натрия, калия или алюмофосфатов) на поверхность полученного

композиционного покрытия с модифицированным составом.

7. Сушка при стандартных условиях негорючего связующего вещества, нанесенного на поверхность полученного композиционного покрытия с модифицированным составом.

Для выполнения экспериментального обоснования целесообразности использования предложенного способа для улучшения радиозащитных и радиопоглощающих свойств негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов были реализованы следующие подготовительные работы.

1. В соответствии со способом, представленным в работе [1], изготовлены экспериментальные образцы, для которых приняты условные обозначения «образцы вида 1» и «образцы вида 2». Образцы вида 1 представляли собой целлюлозные подложки, на поверхностях которых сформировано композиционное покрытие на основе порошкового алюмооксида (электрокорунд); образцы вида 2 – металлические подложки, на поверхностях которых сформировано аналогичное покрытие. Было изготовлено по одной партии образцов каждого из указанных видов.

2. В соответствии с предложенным способом изготовлены экспериментальные образцы, для которых приняты условные обозначения «образцы вида 3» и «образцы вида 4». Образцы вида 3 представляли собой целлюлозные подложки, на поверхностях которых сформировано композиционное покрытие на основе порошкового алюмооксида (электрокорунд), состав которого модифицирован с использованием предложенного способа; образцы вида 4 – металлические подложки, на поверхностях которых сформировано аналогичное покрытие. Было изготовлено по две партии образцов каждого из указанных видов. Первая партия образцов вида 3 была предназначена для применения в ходе экспериментального обоснования целесообразности использования предложенного способа для улучшения радиозащитных свойств негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов, первая партия образцов вида 4 – для применения в ходе экспериментального обоснования целесообразности использования предложенного способа для улучшения радиопоглощающих свойств указанных покрытий. Вторые партии

образцов указанных видов были предназначены для применения в ходе установления класса горючести композиционного покрытия на основе порошкового электрокорунда, состав которого модифицирован в соответствии с предложенным способом.

Экспериментальное обоснование целесообразности использования предложенного способа для улучшения радиозащитных свойств негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов выполнялось на базе результатов измерений и сравнительного анализа значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц партии образцов вида 1 и первой партии образцов вида 3. Экспериментальное обоснование целесообразности использования предложенного способа для улучшения радиопоглощающих свойств негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов выполнялось на базе результатов измерений и сравнительного анализа значений коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц партии образцов вида 2 и первой партии образцов вида 4. Указанные измерения проводились с использованием панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи SNA 0.01–18 согласно методике, представленной в стандарте [9].

Установление класса горючести композиционного покрытия на основе порошкового электрокорунда, состав которого модифицирован в соответствии с предложенным способом, было выполнено согласно стандарту [10].

Результаты и их обсуждение

На *рис. 1* представлены частотные зависимости коэффициентов отражения (S_{11}) и передачи (S_{21}) электромагнитного излучения в диапазоне 0,7...17,0 ГГц партий образцов видов 1 и 3.

На основе анализа зависимостей, представленных на *рис. 1, 2*, было установлено, что модификация состава композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов предложенным способом обуславливает снижение на 4,0...12,0 дБ значений коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц указанных покрытий. Это связано с увеличением поверхностной проводимос-

ти последних, которое приводит к увеличению на 4,0...22,0 дБ значений их коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...9,0 ГГц и, как следствие, к улучшению их радиозащитных свойств.

На рис. 3 представлены частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в указанных диапазонах партий образцов видов 2 и 4.

Из рис. 3 следует, что модификация состава композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов предложенным способом обуславливает снижение на 1,0...6,0 дБ значений их коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазонах частот 0,9...4,0 и 11,0...17,0 ГГц (при условии, что они нанесены на металлические подложки), а значит, и улучшение радиопоглощающих свойств таких покрытий. Это связано с увеличением доли электромаг-

нитных волн указанных диапазонов частот, рассеиваемых поверхностью данных покрытий, вследствие появления на последней распределенных фрагментов изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки, которые, как было отмечено ранее, ввиду своих размеров и проводящих свойств являются по отношению к этим волнам аналогами четвертьволновых антенн.

Модификация состава композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов предложенным способом обеспечивает снижение значений их коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 5,0...10,0 ГГц, скорее всего, ввиду того, что волны указанного диапазона частот, рассеиваемые фрагментами изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки, распределенными по поверхности таких покрытий, взаимодействуют друг с другом в одинаковых фазах.

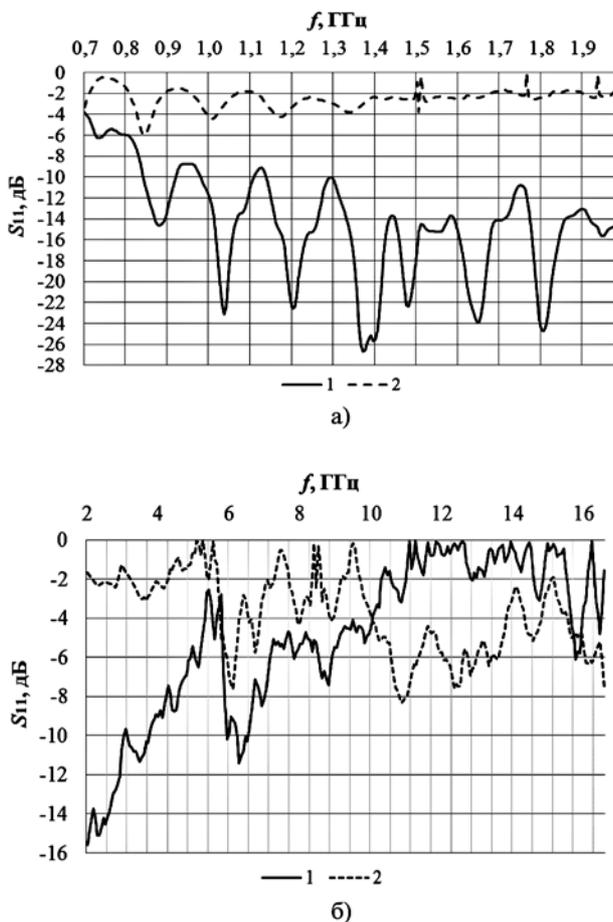


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазонах 0,7...2,0 (а) и 2,0...17,0 ГГц (б) партий образцов видов 1 (кривые 1) и 3 (кривые 2)

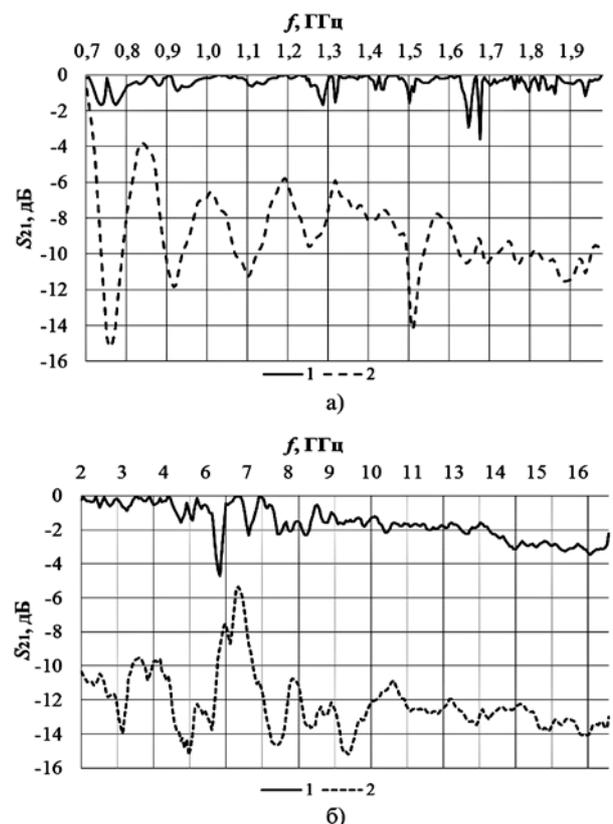


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазонах 0,7...2,0 (а) и 2,0...17,0 ГГц (б) партий образцов видов 1 (кривые 1) и 3 (кривые 2)

Установлено, что композиционное покрытие на основе порошкового алюминоксида, состав которого модифицирован в соответствии с предложенным способом, является негорючим, что обусловлено свойством негорючести порошкового электрокорунда [11], а также связующего вещества, использованного для изготовления покрытия [7, с. 177].

На рис. 4, 5 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне 0,7...17,0 ГГц второй партии образцов вида 3 после проведения с ними экспериментов по оценке класса горючести композиционных покрытий, на основе которых эти образцы были изготовлены; на рис. 6 – частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 0,7...17,0 ГГц второй партии образцов вида 4 после проведения с ними аналогичных экспериментов.

На основе анализа зависимостей, представленных на рис. 4-6, были установлены следующие явления.

1. В результате термообработки образцов вида 3, которая была реализована в ходе установления класса горючести композиционных покрытий на основе порошковых алюминоксидов, состав которых модифицирован в соответствии с предложенным способом, значения их коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц увеличились на 2,0...4,0 дБ, что связано со снижением на 2,0...5,0 дБ значений их коэффициента отражения электромагнитного излучения в указанном диапазоне частот, обусловленным уменьшением проводимости и/или диэлектрической проницаемости указанных покрытий.

2. В результате термообработки образцов вида 4, которая была реализована в ходе установления класса горючести композиционных по-

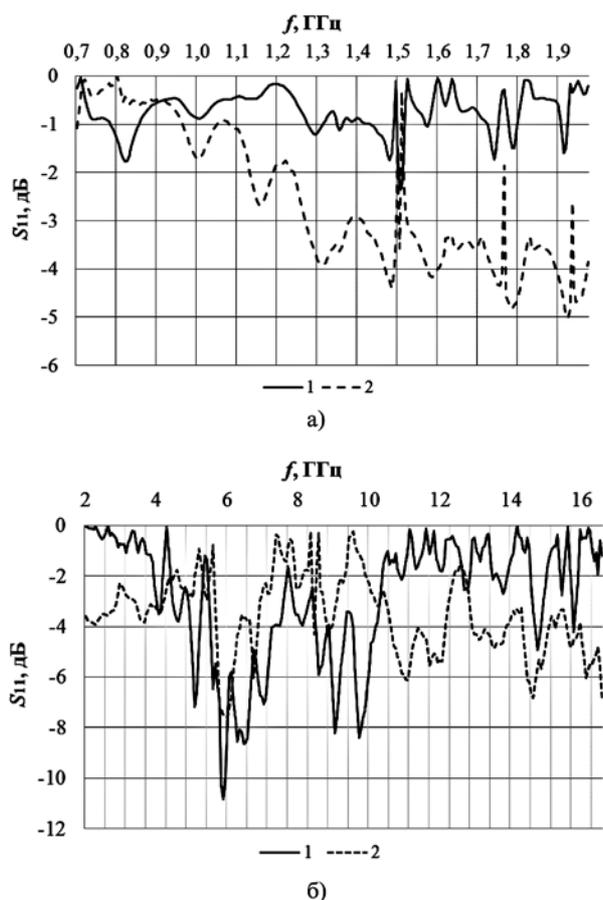


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазонах 0,7...2,0 (а) и 2,0...17,0 ГГц (б) партий образцов видов 2 (кривые 1) и 4 (кривые 2)

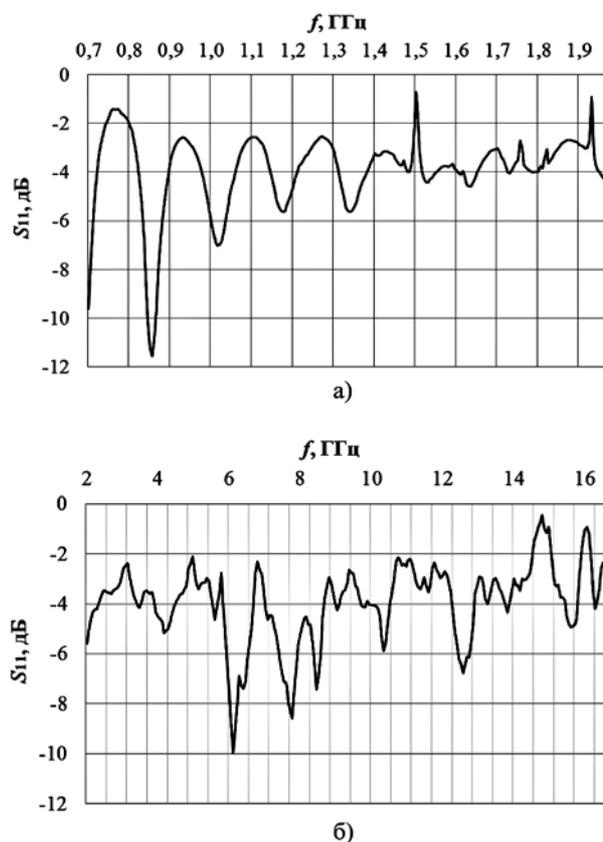


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазонах 0,7...2,0 (а) и 2,0...17,0 ГГц (б) второй партии образцов вида 3

крытий на основе порошковых алюмооксидов, состав которых модифицирован в соответствии с предложенным способом, значения их коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 1,2...6,0 ГГц снизились на 2,0...15,0 дБ, что обусловило улучшение радиопоглощающих свойств указанных покрытий. Причиной рассматриваемого явления, как и явления, описанного в предыдущем пункте, является уменьшение проводимости и/или диэлектрической проницаемости указанных композиционных покрытий после термообработки образцов. На основе описанного явления был сделан вывод о том, что способы модификации состава композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов можно базировать не только на добавлении в него дополнительных компонентов, но и на выполнении термообработки этих покрытий.

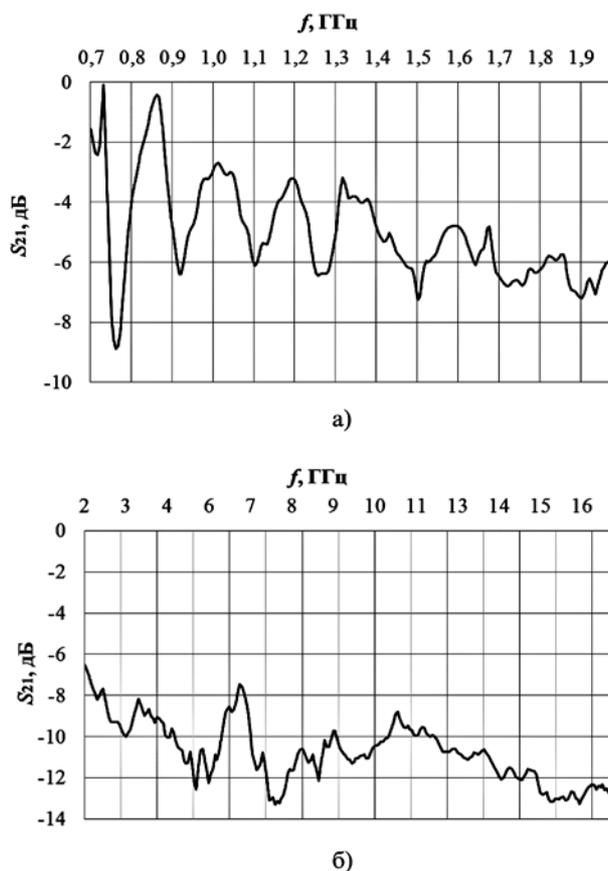


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазонах 0,7...2,0 (а) и 2,0...17,0 ГГц (б) второй партии образцов вида 3

Заключение

На основе результатов проведенного исследования можно сделать вывод о том, что предложенный способ модификации состава композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов представляется перспективным для улучшения радиоэкранирующих и радиопоглощающих свойств этих покрытий при условии сохранения свойства их негорючести. Указанные покрытия с модифицированным в соответствии с предложенным способом составом могут быть использованы как самостоятельные электромагнитные экраны (например, для облицовки стен помещений, которые должны быть защищены от внешнего электромагнитного излучения) ввиду того, что характеризуются низкими значениями коэффициента передачи электромагнитного излучения, обусловленными их радиоэкранирующей способностью.

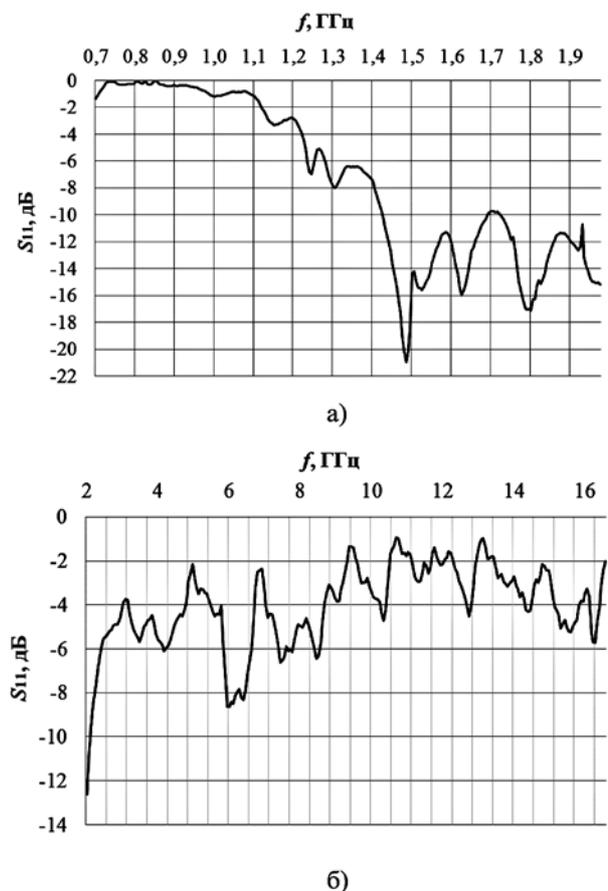


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазонах 0,7...2,0 (а) и 2,0...17,0 ГГц (б) второй партии образцов вида 4

щими свойствами. Эти покрытия также могут быть использованы как наружный слой электромагнитных экранов, используемых для облицовки стен или внутренних перегородок помещений, которые должны быть защищены от внешнего электромагнитного излучения, с целью снижения энергии стоячих (переотраженных) электромагнитных волн в этих помещениях и обеспечения электромагнитной совместимости располагаемых в таких помещениях радиоэлектронных приборов.

Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальное обоснование способа модификации состава негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов, основанного на использовании оксидов переходных металлов, характеризующихся диэлектрическими или магнитными свойствами, а также на выполнении последующей термообработки таких покрытий.

Список литературы:

1. Пеньялоса Овальес Д.И., Лыньков Л.М., Бойправ О.В., Тумилович М.В. Негорючее композиционное покрытие на основе порошкового электрокорунда для электромагнитных экранов // Приборы. 2018. № 6 (216). С. 49-54.
2. Пеньялоса Овальес Д.И., Бойправ О.В., Тумилович М.В., Гусинский А.В., Паскробка Г.С., Лыньков Л.М. Негорючее композиционное покрытие на основе глинозема для изготовления радиопоглощающих конструкций // Приборы. 2020. № 6 (240). С. 39-43.
3. Белоусова Е.С., Махмуд М.Ш.М., Лыньков Л.М., Насонова Н.В. Радиозранирующие свойства бетонов на основе шунгитосодержащих наноматериалов // Нанотехнологии в строительстве. 2013. № 2 (24). С. 56-67.
4. Белоусова Е.С., Мохамед А.М.А., Касанин С.Н. Композиционные материалы на основе технического углерода и гидрогеля для скрытия объектов от средств технической разведки // Доклады БГУИР. 2016. № 1 (95). С. 64-70.
5. Абдулхади Х.Д.А., Прудник А.М. Экранирующие свойства ячеистых структур с углеродсодержащим материалом и фольгированным вспененным полиэтиленом // Доклады БГУИР. 2019. № 6 (124). С. 100-104.
6. Бойправ О.В., Лыньков Л.М., Аль-Машиатт Е.А.А., Абдулхади Х.Д.А. Эластичные электромагнитные экраны на основе комбинированных металлосодержащих элементов / Материалы XXIII науч.-практ. конф. «Комплексная защита информации». Суздаль, 22-24 мая 2018 г. – М.: Медиа Группа «Авангард», 2018. С. 312-315.
7. Бархатов В.И., Добровольский И.П., Капкаев Ю.Ш. Отходы производств и потребления – резерв строительных материалов. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2017. 477 с.
8. McNaught A.D., Wilkinson A. IUPAC. Compendium of Chemical Terminology / A.D. McNaught. – Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1997.
9. ГОСТ 30244–94 Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть.
10. ГОСТ 20271.3–91 Изделия электронные СВЧ. Методы измерения параметров модулирующего импульса.
11. ГОСТ 30333–2007 Паспорт безопасности химической продукции. Общие требования.

Ольга Владимировна Бойправ,

канд. техн. наук, доцент,

Дейвис Исаиас Пеньялоса Овальес,

стажер,

кафедра защиты информации,

Мирослав Викторович Тумилович,

д-р техн. наук, доцент,

начальник управления подготовки

научных кадров высшей квалификации,

Леонид Михайлович Лыньков,

д-р техн. наук, профессор,

научный руководитель,

научно-исследовательская лаборатория

«Материалы и элементы электронной

и сверхпроводниковой техники»

научно-исследовательской части,

УО «Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники»,

г. Минск, Республика Беларусь,

e-mail: boiprav@tut.by