

УДК 621.762

И.Д. Краев¹, В.А. Говоров², В.В. Широков¹, К.А. Шашкеев¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ КАРБОНИЛЬНОГО ЖЕЛЕЗА
НА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТА
НА ИХ ОСНОВЕ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-51-60

Рассматриваются магнитные наполнители для радиопоглощающих полимерных композиционных материалов, в качестве которых выступают порошки карбонильного железа различной дисперсности.

Рассмотрена технология получения порошков функционального наполнителя различной дисперсности путем механического измельчения в лабораторной бисерной мельнице. Приведены результаты анализа полученных порошковых фракций карбонильного железа. Методами растровой электронной микроскопии выявлены размерные отличия. Описаны технологии изготовления экспериментальных образцов тонкослойных покрытий и вспененных композиционных материалов на основе полученных наполнителей. Проведены экспериментальные исследования образцов на основе полученных порошковых частиц карбонильного железа с целью определения радиопоглощающих свойств материала. Продемонстрированы зависимости коэффициента отражения экспериментальных образцов от частоты.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15.3. «Материалы и покрытия для защиты от ЭМИ, ударных, вибрационных, акустических и электрических воздействий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: радиопоглощающие материалы, магнитная проницаемость, функциональные частицы, бисерная мельница, морфология, коэффициент отражения, фракция, карбонильное железо, дисперсность.

The article deals with magnetic fillers for radio-absorbing polymer composite materials, which serve carbonyl iron powders with different particle sizes.

The technology of producing functional filler powders with different particle sizes by mechanical grinding in a laboratory bead mill is considered. The results of the analysis of the fractions of carbonyl iron powder are given. The dimensional differences are revealed by scanning electron microscopy. We describe the manufacturing technology of experimental samples of thin-film coatings and foam composite materials on the basis of the excipients. Experimental studies of samples derived on the basis of carbonyl iron powder particles are carried out to determine radio-absorbing properties of the material and identify differences. The dependence of reflection coefficient of the experimental samples on frequency is shown.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 15.3. «Materials and coatings for protection against EME, shock, vibrating, acoustic and electric influences» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: radio-absorbing materials, magnetic permeability, functional particles, bead mill, morphology, reflection coefficient, fraction, carbonyl iron, dispersibility.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный Исследовательский Университет «МЭИ» [National Research University «Moscow Power Engineering Institute»]; e-mail: universe@mpei.ac.ru

Введение

Восстановление и развитие научно-технического потенциала отечественной промышленности и организации малотоннажного производства стратегических, дефицитных и импортозамещающих материалов являются приоритетными направлениями в деятельности ведущих научно-исследовательских и научно-производственных

учреждений России [1]. В настоящее время главенствующую роль в развитии современных научных знаний начинают выполнять фундаментальные науки, в том числе и материаловедение. Любые открытия и технологии непременно опираются на положения фундаментальной науки, а в случае противоречия с конвенциональными представлениями не только стимулируют модификации

таковых, но и нуждаются в фундаментальных исследованиях для полноценного понимания процессов и механизмов, лежащих в основе того или иного феномена. Фундаментальные подходы становятся неотъемлемой частью при разработке новых материалов и технологий.

Создание новых гибридных композиционных материалов (КМ) невозможно без знания основных свойств, заложенных в разрабатываемый материал. Радиопоглощающие материалы (РПМ), как правило, представляют собой композиты, радиотехнические свойства которых определяются магнитными и диэлектрическими характеристиками матрицы и наполнителя. Матрицы большинства РПМ прозрачны к действию электромагнитного излучения (ЭМИ) или, иными словами, радиопрозрачны. Радиопрозрачность матрицы материала обуславливается снижением отражения электромагнитной волны (ЭМВ) от передней границы композиционного материала при переходе ее из одной среды в другую. Отражение ЭМИ от поверхности КМ зависит от диэлектрической проницаемости матрицы: чем ближе значение диэлектрической проницаемости матрицы к значению диэлектрической проницаемости воздуха, равному единице, тем ниже отражение ЭМВ или, другими словами, выше радиопрозрачность матрицы. Существует ряд матриц, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами и значениями диэлектрической проницаемости, близкими к величине диэлектрической проницаемости воздушной среды. В качестве таких матриц могут выступать эпоксидные связующие, силиконовые каучуки, фторполимеры, фторсиликоновые каучуки, полиуретаны, а также керамика и стеклокристаллические материалы. Стеклокристаллические материалы сочетают преимущества технологии стекла и кристаллических материалов. Наибольшее практическое применение получили кордиеритовые ситаллы на основе магнийалюмосиликатной системы [2]. К наиболее востребованным полимерным связующим при создании радиопоглощающих материалов и покрытий относятся силиконовые и фторсиликоновые каучуки. Использование данных типов матриц обуславливается их малой плотностью, высокими эластичными свойствами и температурами эксплуатации не менее 250°C. Современные тенденции в области силиконовых и фторсиликоновых каучуков и резин на их основе приведены в работе [3]. Одной из технологических операций повышения радиопрозрачности материала является его вспенивание. Поглощение ЭМВ в ряде композиционных материалов и покрытий достигается благодаря введенному в матрицу наполнителю. В зависимости от типа наполнителя радиопоглощающие КМ могут иметь магнитные и диэлектрические потери (иначе диэлектрические потери можно назвать омическими). В случае диэлектрических потерь энергия электриче-

ского поля ЭМВ переходит в тепловую в связи с возбуждением затухающих токов в наполнителе. В данном случае наполнителем РПМ являются волокнистые вытянутые частицы различных длин, обладающие определенными значениями электропроводности и сопротивления. В большинстве РПМ в качестве наполнителя диэлектрического типа используются углеродсодержащие волокнистые частицы и нанотрубки.

Толщина КМ, наполненных углеродсодержащими волокнами, может варьироваться от 3–4 мм до нескольких сантиметров. К тому же большинство таких материалов имеют ярко выраженный резонанс в определенном частотном диапазоне. С увеличением толщины материала при заданной концентрации волокон ширина рабочего диапазона возрастает. В настоящее время с целью уменьшения габаритных характеристик РПМ диэлектрического типа при расширении рабочего диапазона в качестве наполнителя используют нанотрубки. Радиотехнические характеристики композита на основе нанотрубок определяются их организацией в матрице материала. Необходимую структуру КМ получают путем функционализации углеродных нанотрубок (УНТ) [4].

К тому же в ряде исследовательских работ выявлена положительная динамика влияния нанотрубок в качестве наполнителей КМ не только на радиотехнические характеристики, но и на физико-механические, термические и прочие эксплуатационные свойства [5]. Благодаря высокой прочности при разрыве и большой величине соотношения длина/диаметр, УНТ являются превосходным материалом для упрочнения композитов. По данным компании General Motors добавление 11,5% (по массе) многослойных УНТ к полипропилену повышает его прочность при разрыве в 2 раза. Исследования, проведенные в токийском университете, показали, что добавление 5% (объемн.) нанотрубок к алюминию также увеличивает его прочность в 2 раза, а 10% (объемн.) – приводит к увеличению прочности в 6 раз. В настоящее время все большую актуальность приобретает разработка методов введения нанотрубок в металлы и пластические массы [6].

Следующей большой группой радиопоглощающих материалов являются КМ магнитного типа. Наполнителями таких композитов, как правило, являются частицы различных составов и морфологии, обладающие высокими значениями магнитной проницаемости. К ним относятся ферромагнетики, суперпарамагнетики и ферриты. В качестве основы (химический состав) наполнителей магнитного типа чаще всего используются металлы Fe, Ni и Co, различные их сплавы и соединения. Широкое применение в качестве наполнителя для радиопоглощающих КМ получил порошок карбонильного железа марки P-10 [7].

К основному преимуществу радиопоглощающих композитов магнитного типа относится их

малая толщина по сравнению с материалами диэлектрического типа при более широком рабочем радиочастотном диапазоне. Это является основной причиной использования РПМ в качестве покрытий для различных объектов, в том числе для летательных аппаратов. Поглощение ЭМИ и переход энергии излучения в тепловую энергию осуществляется путем перемагничивания магнитных областей (доменов) наполнителя в зависимости от направления действия вектора магнитной напряженности ЭМВ. Основным недостатком данных КМ является высокое значение их объемной плотности. Снижение весовых характеристик КМ магнитного типа при сохранении их радиопоглощающих свойств является актуальной задачей. Для ее решения проведены исследования влияния морфологии наполнителя на радиотехнические характеристики [8]. Установлено, что увеличение линейных размеров магнитных частиц функционального наполнителя приводит к появлению омических потерь, что усиливает поглощение энергии ЭМИ. В связи с этим для обеспечения схожих радиотехнических свойств в КМ требуется меньшее количество магнитного наполнителя. К другому вероятному способу снижения весовых характеристик РПМ можно отнести уменьшение дисперсности магнитного наполнителя или, иными словами, уменьшение размеров функциональных частиц. В работе [9] выявлены основные факторы, определяющие СВЧ материальные параметры композиционных материалов в различном диапазоне частот. Отмечено, что основное различие СВЧ магнитной проницаемости исследованных порошков в низкочастотном диапазоне (до 3 ГГц) возникает главным образом вследствие различия формы частиц. На более высоких частотах магнитные свойства обусловлены в основном скин-эффектом и определяются размером частиц порошков.

Существует ряд научных работ, в которых описан синтез РПМ, наполненных наноразмерными ферромагнитными частицами [10]. Одним из наиболее технологичных способов получения наноразмерного наполнителя является термораспад металлодержащих соединений в матрице КМ [11].

Для определения влияния дисперсности магнитного наполнителя на радиопоглощающие характеристики КМ проведена экспериментальная работа.

Материалы и методы

В качестве исследуемого наполнителя выбран порошок карбонильного железа марки Р-10 с размером частиц 10 мкм. Для получения более мелкой фракции выбранного металлического порошка проводили бисерный помол. Данный метод получения дисперсии удобен с точки зрения технологичности введения наполнителя в матрицу материала. Помол может быть осуществлен не только в органических растворителях, но и в различных связующих определенной вязкости [12]. В данной работе в качестве среды механического измельчения использовался бутанол-1.

Механическое измельчение производилось при помощи лабораторной бисерной мельницы Labstar1 производства компании Netzsch GmbH (рис. 1).

В качестве мелющих тел использовали «бисер» из оксида циркония размером 0,6–0,8 мм. В камеру объемом 300 мл загружали 180 мл «бисера», что составляет ~60% от всего объема размольной камеры. Непосредственно в дежу предварительно вводили 320 мл бутанола, далее в течение 30 мин вводили пять порций карбонильного железа массой по 50 г (каждая). После процесса загрузки количество оборотов основного вала в камере увеличивали до 1500 об/мин. Затем добавляли еще 300 мл бутанола и 240 г железа. Массовое соотношение бутанола и железа составляет 1:1 (плотность бутанола: 0,8 кг/л). После помола в течение 2 ч отобраны 12 проб образца объемом по 10 мл (каждая) с целью подбора стабилизирующей добавки – поверхностно-активного вещества (ПАВ). На каждый 1 г образца добавляли 0,01 г ПАВ. Образцы выдерживали в течение 24 ч, затем отбирали несколько более или менее гомогенных и нерасслоившихся образцов. Результаты измерения размера частиц методом динамического светорассеяния,

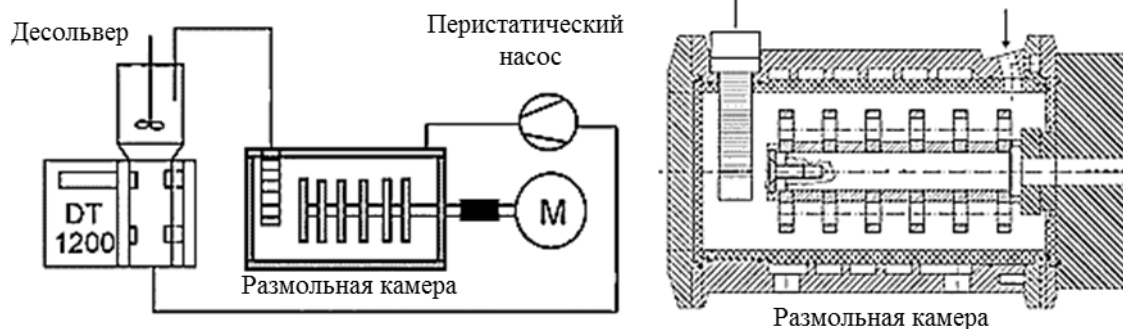


Рис. 1. Схема бисерной мельницы

выполненного на приборе Nano ZS производства фирмы Malvern Instruments, и наблюдения за образцами представлены в таблице.

Окончательный выбор ПАВ для обработки дисперсии основывался на оценке степени обработки частиц железа ПАВ. Наличие окраски позволило предположить, что мелкие частицы стабилизируются (окрашенные образцы: 1, 2, 4, 5, 6, 8, 12). Отобранные образцы отфильтрованы с помощью хроматографических фильтров с диаметром пор 0,45 мкм. Полученные дисперсии исследованы методом динамического светорассеяния. Размер частиц для всех отфильтрованных образцов составил 30–150 нм. Единственный отличающийся от других образец 7, у которого концентрация частиц после фильтрации значительно больше, имел средний размер частиц 180 нм. Из этого сделан вывод, что данный ПАВ (ВУКJET 9150) позволяет диспергировать железо немного лучше, чем остальные. Решено использовать этот ПАВ как диспергатор для железа в процессе измельчения.

Проведен дополнительный помол железа в бутаноле с введенным ПАВ. В 328 г дисперсии, где содержится 160 г железа, ввели 3,3 г добавки ВУКJET 9150. Затем проведен помол в течение 6 ч. После 4 ч помола отобрано 100 г образца. После 6 ч помола получено ~200 г образца.

Для определения размеров полученных дисперсий и выявления зависимости их размеров от продолжительности помола, методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) проведено их исследование.

В процессе РЭМ проводили качественный анализ и количественное определение геометрических параметров структуры (на различных раз-

мерных уровнях при увеличении от $\times 50$ до $\times 20000$). Исследования проводили с использованием растрового электронного микроскопа.

Структура порошковых частиц карбонильного железа представлена на рис. 2.

При детальном изучении структуры данных порошков установлены отличительные особенности формы и размеров частиц:

- частицы порошка железа в исходном состоянии имеют глобулярную форму с разбросом значений диаметров – в среднем от 5 до 10 мкм;
- после 4 ч помола наблюдались незначительные изменения на поверхности частиц в виде неровностей, искажений и впадин, диаметр и форма при этом не менялись;

– после 6 ч помола частицы разрушались с образованием порошка существенно иного гранулометрического состава (размер частиц варьировался от 0,5 до 4 мкм). На поверхности образовавшихся частиц неправильной формы наблюдалось появление шероховатостей и изломов.

Следует также отметить образование конгломератов и различных скоплений данных частиц.

В результате проведенного помола образовалась новая фракция порошка карбонильного железа с частицами меньшего размера.

Дифрактометрические исследования проводили на вертикальном рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 6000 при комнатной температуре в монокроматическом медном излучении с длиной волны $\lambda_{K_{\alpha, \text{cp}}} = (2\lambda_{K_{\alpha 1}} + \lambda_{K_{\alpha 2}}) / 3 \approx 0,1542$ нм.

Кристаллические фазы идентифицировали по базе данных PDF2 ICDD-2003.

Дифрактограмма порошка железа различных фракций показана на рис. 3.

Размер частиц образцов с введенными ПАВ

Условный номер образца	ПАВ	Примечание
11	Исходная дисперсия	Образец расслоился
1	DISPERBYK 194	Образец расслоился, жидкость окрашена
2	DISPERBYK 182	То же
3	DISPERBYK 182	Образец расслоился, жидкость прозрачная
4	DISPERBYK 180	Образец расслоился, жидкость окрашена
5	DISPERBYK 185	То же
6	DISPERBYK 168	–«–
7	ВУКJET 9150	Образец расслоился, плотный осадок
8	ВУК-P 104	Образец расслоился, жидкость окрашена
9	DISPERBYK 190	Образец расслоился, жидкость прозрачная
10	DISPERBYK 111	То же
12	Октилтриэтоксисилан	Образец расслоился, жидкость окрашена
13	Фенилтриметоксисилан	Образец расслоился, жидкость прозрачная

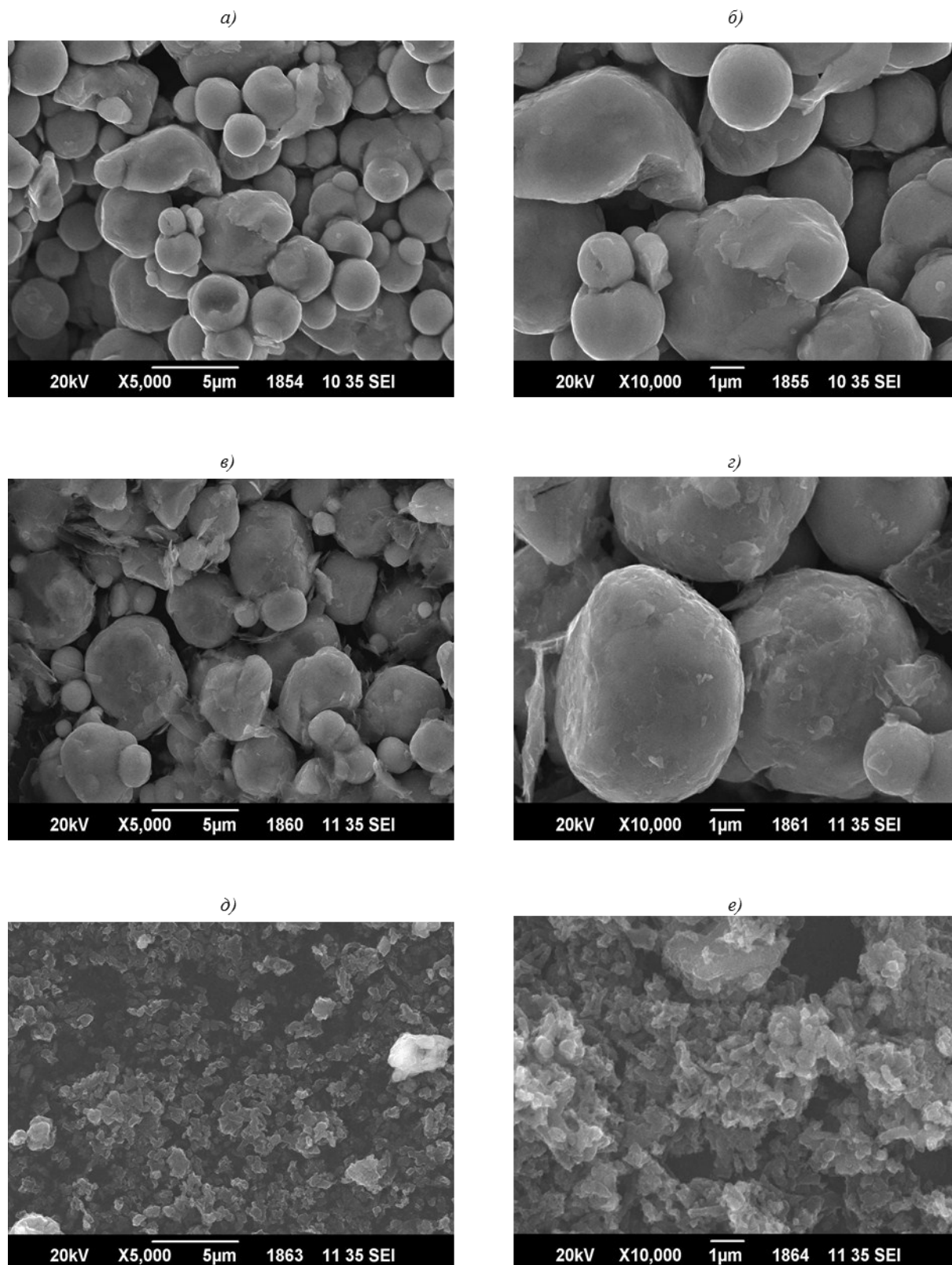


Рис. 2. Структура порошковых частиц карбонильного железа в исходном состоянии (а, б), после 4 (в, г) и 6 ч помола (д, е)

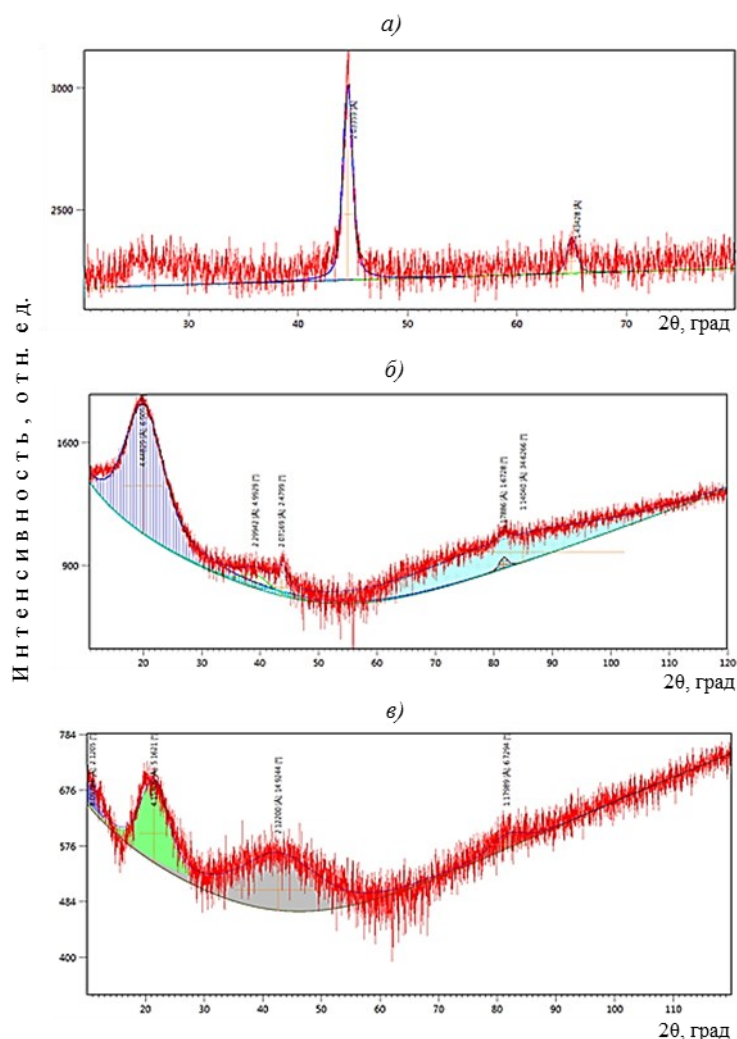


Рис. 3. Дифрактограмма порошка железа в исходном состоянии (а), после 4 (б) и 6 ч помола (в)

На рентгеновских дифрактограммах (рис. 3) порошка карбонильного железа в исходном состоянии и после помола в течение 4 и 6 ч наблюдаются рефлексы, соответствующие рефлексам α -Fe (85-1410 – база PDF2). Уширение рефлексов в процессе помола существенно возрастает. Нижняя оценка размера области когерентного рассеивания (ОКР), произведенная в соответствии с формулой Селякова–Шеррера для геометрического коэффициента 0,9, составляет: 9 нм – для порошка в исходном состоянии, 2 нм – после 4 ч помола, менее 1 нм – после 6 ч помола. Таким образом, частицы являются поликристаллическими, причем в процессе помола происходит существенное уменьшение размеров ОКР фазы α -Fe. На дифрактограммах образцов, подвергавшихся помолу, также наблюдаются гало, принадлежность которых не была установлена.

Изготовлены экспериментальные образцы для определения влияния дисперсности функциональных частиц порошка карбонильного железа на радиопоглощающие характеристики композита. В

качестве матрицы использовали полидиметилсiloксановый каучук марки СКТН-А.

Изготовлены тонкослойные покрытия и пористые композиционные материалы. Тонкослойные покрытия получены по лакокрасочной технологии [13].

Раствор порошка карбонильного железа в бутаноле перемешивали с помощью ультразвуковой ванны «Ультразвук» в течение 1 ч до полной гомогенизации смеси. Затем в раствор вводили необходимое количество полидиметилсiloксанового каучука СКТН-А, после чего производили перемешивание в верхнеприводной мешалке HS-30T-Set в течение 10–15 мин до образования однородной смеси. Рассчитав массу композиции, необходимую для нанесения слоя на металлическую подложку, полученный состав разливали порционно в одинаковые емкости (с учетом потерь). Перед нанесением каждого нового слоя в навеску добавляли необходимое количество сшивающего агента – катализатора К-18. После перемешивания смеси ее наносили кистью на

металлическую подложку. Сушка каждого слоя при температуре 60°C занимала 15 мин. Изготовлены образцы с различным объемным содержанием порошка карбонильного железа в исходном состоянии и после 6 ч помола. Образцы имели квадратную форму со стороной 110 мм при одинаковой толщине, равной 0,9 мм.

Для изготовления пористых КМ на основе полидиметилсилоксана, наполненного порошком

карбонильного железа различной дисперсности, гомогенную смесь выливали в квадратную рамку со стороной 110 мм и толщиной стенок 5 мм. Гомогенизацию раствора карбонильного железа в бутаноле с введенным в него каучуком проводили аналогичным образом – как и в случае изготовления тонкослойного покрытия. Разделение смеси по емкостям не производилось. Сшивающий агент (катализатор К-18) вводили в смесь в

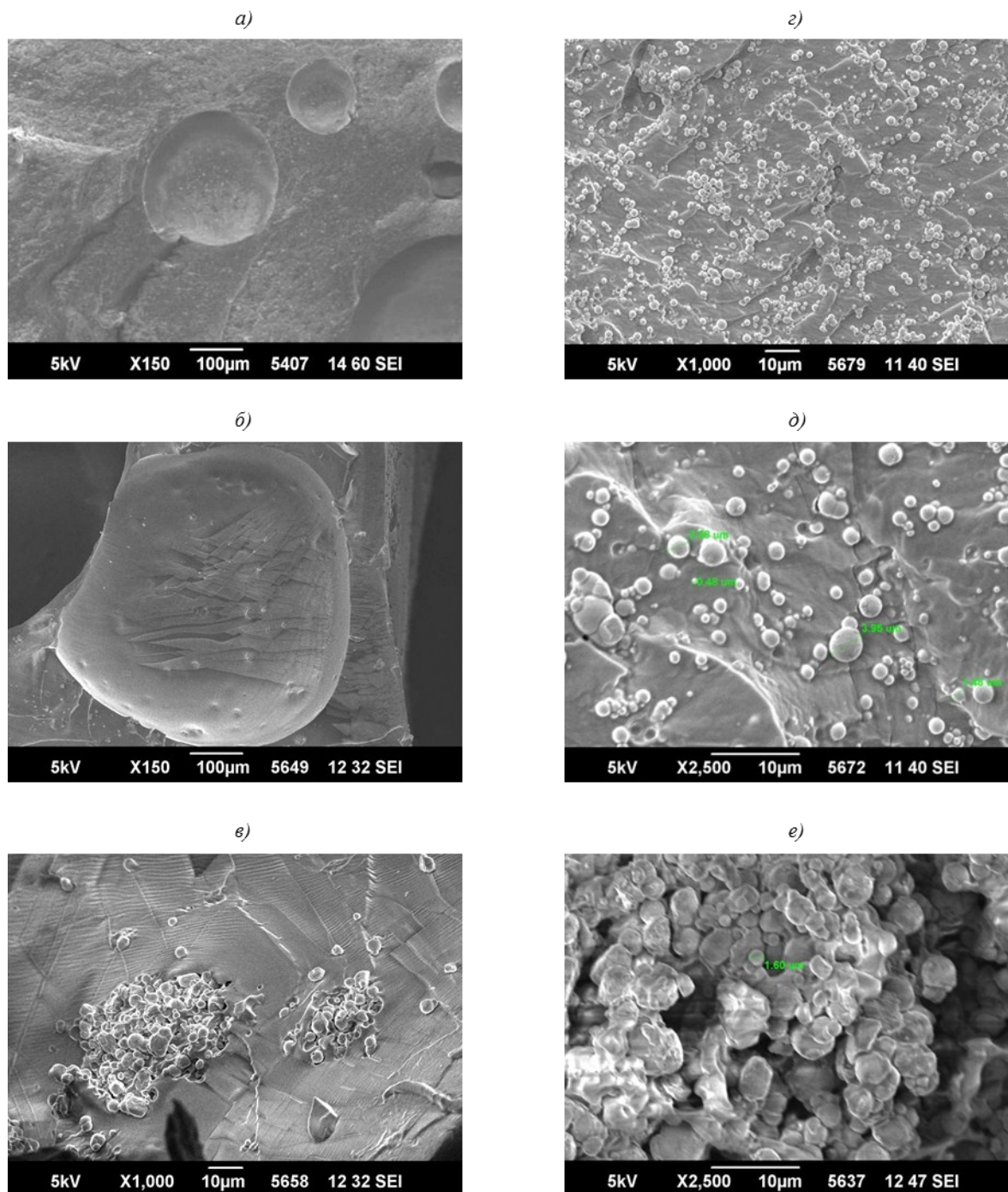


Рис. 4. Внешний вид экспериментальных образцов, наполненных порошком карбонильного железа после 6 ч помола:

а-в – тонкослойное покрытие; г-е – вспененный материал

полном объеме, после чего состав перемешивали с использованием верхнеприводной мешалки HS-30T-Set в течение 5–7 мин. Полученную смесь выливали в рамку на металлической подложке, затем помещали в сушильный шкаф и выдерживали при температуре 100°C в течение 8 ч. По окончании термической обработки образцы вспененного материала сушили при комнатной температуре до полного испарения бутилового спирта (в течение 36 ч). Изготовлены образцы вспененного силиконового каучука, наполненные порошком карбонильного железа различных концентраций в исходном состоянии и после 6 ч помола. Толщина данных образцов составила 4,5 мм.

Рассмотрено распределение порошковых частиц карбонильного железа различной дисперсности в изготовленных образцах тонкослойных покрытий и наполненных силиконовых пен с использованием растровой электронной микроскопии. В процессе РЭМ проводили качественный анализ, количественное определение геометрических параметров введенных порошковых частиц и их распределение в объеме матрицы (на различных размерных уровнях при увеличении от $\times 50$ до $\times 20000$). Исследования проводили с использованием растрового электронного микроскопа.

Структура экспериментальных образцов тонкослойного покрытия и вспененного материала, наполненных порошком карбонильного железа после (6 ч помола), показана на рис. 4. Видно, что распределение порошковых частиц наполнителя в тонкослойном покрытии более равномерное, чем

во вспененном материале, в объеме которого были обнаружены конгломераты.

Как правило, для оценки радиопоглощающих свойств материалов проводят измерения диэлектрических и магнитных характеристик, а также коэффициентов прохождения и отражения, используя различные методы неразрушающего контроля [14]. Определение значений магнитной и диэлектрической проницаемости радиопоглощающих материалов позволяет моделировать и устанавливать входные параметры композита, такие как концентрация наполнителя, толщина материала и его плотность, с помощью которых можно достичь необходимых показателей коэффициента отражения и прохождения в заданном частотном диапазоне или его поддиапазонах [15].

Значения коэффициентов отражения и прохождения можно получить как расчетным методом (определение проницаемости), так и с помощью измерений с использованием векторного анализатора цепей и рупорной антенны.

Радиотехнические характеристики изготовленных образцов определяли на векторном анализаторе цепей Agilent N5230C с рупорной антенной с апертурой 100×100 мм.

Схема измерительного стенда приведена на рис. 5.

В данной работе проводили измерения коэффициентов отражения в диапазоне от 7,5 до 12,5 ГГц. После проведения измерения коэффициентов отражения у образцов тонкослойных

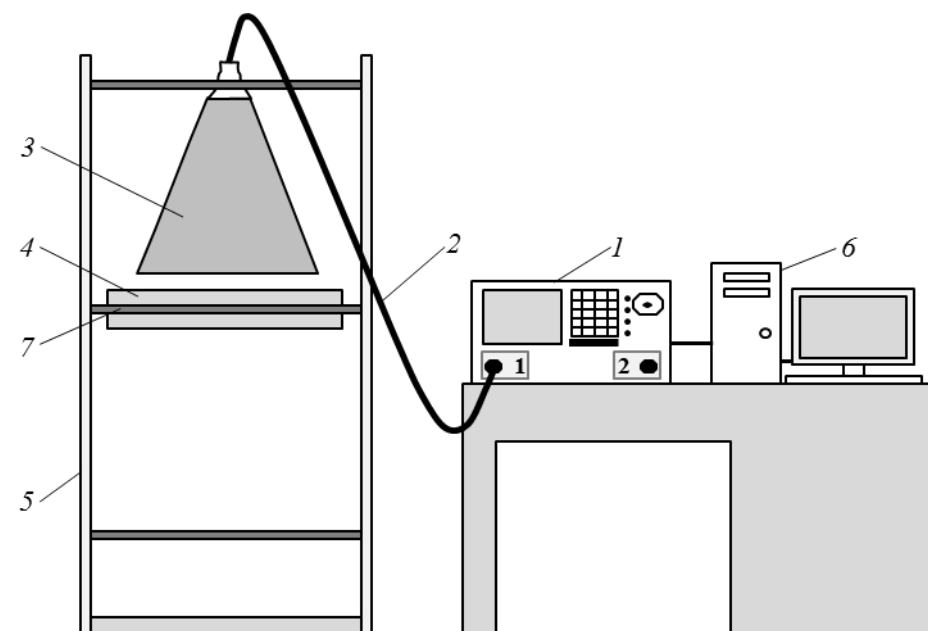


Рис. 5. Функциональная схема стенда для измерения коэффициента отражения экспериментальных образцов в заданном частотном диапазоне:

1 – анализатор цепей векторный; 2 – кабель СВЧ; 3 – приемопередающая антенна; 4 – экспериментальный образец; 5 – стойка для установки антенн и перемещения образца; 6 – персональный компьютер; 7 – эквивалент отражателя с удельным электросопротивлением 1 Ом·м

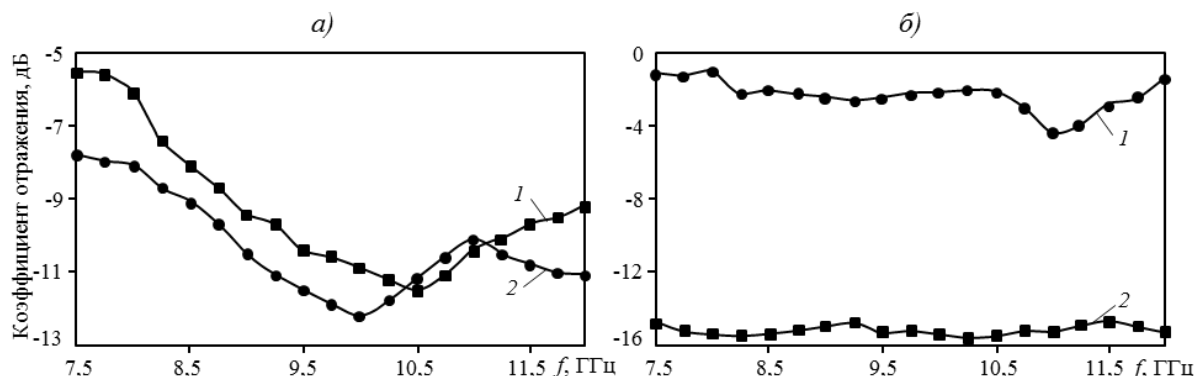


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от частоты для образцов тонкослойных покрытий (а) и вспененного материала (б):

1 – образец, наполненный порошком карбонильного железа в исходном состоянии; 2 – образец, наполненный порошком карбонильного железа после 6 ч помола

покрытий установлено, что образцы, наполненные порошком карбонильного железа после 6 ч помола, при более низких концентрациях наполнителя, обеспечивают схожее значение коэффициентов отражения с образцами, наполненными порошком карбонильного железа в исходном состоянии с более высокой концентрацией наполнителя. При этом масса образцов покрытий, наполненных порошком в исходном состоянии, на 40% больше. Следовательно, можно сделать вывод, что уменьшение размеров функционального наполнителя способствует снижению его объемного содержания в РПМ и снижению весовых характеристик композита при сохранении радиотехнических свойств в поддиапазонах диапазона частот. Зависимости коэффициента отражения от частоты для образцов тонкослойных покрытий, наполненных порошками карбонильного железа в исходном состоянии и после 6 ч помола, объемное содержание которого в 2,5 раза меньше, представлены на рис. 6, а.

Измерение зависимостей коэффициента отражения для образцов вспененного материала, содержащих две различные фракции карбонильного железа, продемонстрировало, что при равных объемных концентрациях функциональных частиц образец, наполненный порошком карбонильного железа после 6 ч помола, обладает высокой поглощающей способностью в отличие от образца, наполненного порошком в исходном состоянии. Зависимости коэффициента отражения от частоты для образцов вспененных материалов приведены на рис. 6, б.

Видно, что образец, наполненный порошком карбонильного железа после 6 ч помола, имеет коэффициент отражения не выше -15 дБ во всем частотном диапазоне без выраженного резонанса. В то же время образец, наполненный порошком в исходном состоянии той же концентрации, имеет высокие коэффициенты отражения, близкие к -1 дБ, с резонансом при частоте 11 ГГц. Вероятно, отличие радиопоглощающих свойств обусловлено не только дисперсностью функционального наполнителя, но и его распределением в объеме вспененного КМ.

Результаты, обсуждение и заключения

В результате проведенной работы, путем механического измельчения порошков исходного состава удалось получить тонкодисперсный ферромагнитный наполнитель. Подобраны необходимые ПАВ для стабилизации коллоидных растворов и изготовлены экспериментальные образцы РПМ по двум различным технологиям. Методом растровой электронной микроскопии проведены исследования порошковых наполнителей и образцов РПМ, в процессе которых наблюдалось равномерное распределение функционального наполнителя в тонкослойных покрытиях и образование многочисленных конгломератов порошковых частиц в объеме вспененного материала. Проведены исследования зависимостей коэффициента отражения от частоты для образцов тонкослойных покрытий и вспененного материала, по результатам которых удалось установить влияние дисперсности наполнителя на радиопоглощающие свойства композита. С уменьшением размера порошковых частиц функционального наполнителя требуется меньшее его количество по сравнению с образцами, наполненными исходным порошком, при сохранении радиопоглощающих свойств в поддиапазонах диапазона частот. Данный эффект наблюдался на образцах тонкослойных покрытий. Уменьшение размера частиц функционального наполнителя также способствовало снижению весовых характеристик композита на 40% при сохранении радиотехнических свойств, а именно схожих значений коэффициента отражения в определенных частотных поддиапазонах. У вспененных материалов, наполненных более мелкой порошковой фракцией, отмечались ярко выраженные поглощающие свойства, которые можно объяснить не только влиянием дисперсности наполнителя, но и его распределением в объеме материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-38-20717 мол_а_вед.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Чайникова А.С., Воропаева М.В., Алексеева Л.А., Орлова Л.А., Самсонов В.И. Современное состояние разработок в области радиопрозрачных кордиритовых ситаллов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S6. С. 45–51. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-45-51.
3. Венедиктова М.А., Наумов И.С., Чайкун А.М., Елисеев О.А. Современные тенденции в области фтор-силоксановых и силоксановых каучуков и резин на их основе (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S3. С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-17-24.
4. Кондрашов С.В., Гуняева А.Г., Шашкеев К.А., Баринов Д.Я., Солдатов М.А., Шевченко В.Г., Музафаров А.М. Электропроводящие гибридные полимерные композиционные материалы на основе нековалентно функционализированных углеродных нанотрубок // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №2. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-10-10.
5. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // *Российские нанотехнологии*. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.
6. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Попков О.В., Соловьянчик Л.В. Перспективные технологии получения функциональных материалов конструкционного назначения на основе нанокмпозитов с УНТ (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №3. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-7-7.
7. Zhuravlev V.A., Suslyayev V.I., Korovin E.Yu., Dorozhkin K.V. Electromagnetic Waves Absorbing Characteristics of Composite Material Containing Carbonyl Iron Particles // *Materials Sciences and Applications*. 2014. №5. P. 803–811.
8. Краев И.Д., Образцова Е.П., Юрков Г.Ю. Влияние морфологии магнитного наполнителя на радиопоглощающие характеристики композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 10–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-10-14.
9. Елсуков Е.П., Розанов К.Н., Ломаева С.Ф. и др. Влияние формы, химического и фазового состава частиц на основе Fe на СВЧ-характеристики композитов с диэлектрической матрицей // *Журнал технической физики*. 2009. Т. 79. Вып. 4. С. 125–130.
10. Фионов А.С., Юрков Г.Ю., Колесов В.В. и др. Композиционный материал на основе железосодержащих наночастиц для применения в задачах электромагнитной совместимости // *Радиотехника и электроника*. 2012. Т. 57. С. 597–608.
11. Юрков Г.Ю., Кондрашов С.В., Краев И.Д. Нанокмпозиты на основе полиэтилена высокого давления и наночастиц кобальта: синтез, структура и свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 29–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-29-33.
12. Авцынова Е.О., Говоров В.А., Маскаев Е.А. Получение дисперсии монтмориллонита во фталевом ангидриде в органическом растворителе // *Кабели и провода*. 2013. №3. С. 27–31.
13. Нефедов Н.И., Семенова Л.В. Нанесение лакокрасочных покрытий методом «сырой по сырому» // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №4. С. 39–42.
14. Шульдешов Е.М., Лепешкин В.В., Романов А.М. Метод неразрушающего контроля комплексной диэлектрической проницаемости входных слабо наполненных слоев градиентных радиопоглощающих полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №10. Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 23.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-11-11.
15. Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик стеклосотопласта волноводным методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №4. С. 62–70.