

К. ф.-м. н. **С. Г. Пономарев**¹, к. т. н. **В. П. Тарасовский**^{1,2} (✉),
д. ф.-м. н. **В. И. Кошкин**³, к. т. н. **Ю. М. Боровин**¹

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», Москва, Россия

² ЗАО «НТЦ «Бакор», г. Щербинка Московской обл., Россия

³ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Россия

УДК 666.3/7:669.7.018-492.2

КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОГЛОТИТЕЛИ СВЧ-ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ПРОДУКТОВ ХИМИЧЕСКОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Приведены результаты исследований электрофизических свойств керамических материалов из порошков, изготовленных методом химического диспергирования алюминиево-магниевых сплавов. Продемонстрирована возможность использования этих материалов в качестве объемных поглотителей СВЧ-энергии. Показано, что высокая термостойкость исследуемых материалов дает возможность использовать их в качестве теплоизоляционных и огнеупорных материалов в системах, требующих защиты от СВЧ-излучения.

Ключевые слова: керамические поглотители СВЧ-энергии, ультрадисперсные порошки, электрофизические параметры.

Поглотители СВЧ-энергии (энергии электромагнитных колебаний сверхвысокочастотного диапазона) — неотъемлемая часть преобладающего большинства электровакуумных, радиоэлектронных и других приборов и устройств [1, 2]. Их применение чрезвычайно разнообразно: высокочастотные развязки, поглотители паразитных видов колебаний, согласующие нагрузки и др. Среди множества известных поглощающих СВЧ-энергию материалов наиболее перспективны так называемые объемные поглотители. Основные требования к таким материалам вытекают из их предназначения — поглощение СВЧ-энергии, преобразование ее в тепло и рассеивание избыточной энергии. Иначе говоря, такие материалы должны иметь высокие значения диэлектрической проницаемости ϵ , тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ и теплопроводности λ . Кроме того, они должны быть дешевыми и достаточно легкими, чтобы не утяжелять прибор, в котором используются.

Спектр материалов для создания поглотителей довольно широк. Например, это могут быть композитные материалы на основе порошкообразного феррита и полимерной связки. Однако применение таких материалов ограничено температурой 100–200 °С. В настоящее время широкое применение в качестве поглотителей

нашли керамические материалы [3]. Такие материалы выдерживают нагрев до 1000 °С и могут быть диэлектриками (например, материал марки ВКТ93-1 из Al_2O_3 с добавками SiO_2 , CaO и TiO_2) или полупроводниками-диэлектриками (например, КТ-30 из TiO_2). В первом случае удельное объемное электросопротивление ρ материала порядка 10^{10} – 10^{12} Ом·м, во втором 10^2 Ом·м. Производство поглотителей СВЧ-энергии из таких материалов сопряжено со значительными трудностями, так как их обжиг проводится при 1900 °С в атмосфере водорода. Поэтому задача создания керамических материалов для поглотителей СВЧ-энергии, спекаемых при относительно невысоких температурах в воздушной атмосфере, является на сегодняшний день весьма актуальной.

В ФГБОУ ВО МАМИ в течение последних нескольких лет успешно изучаются керамические материалы из порошков, полученных методом химического диспергирования алюминиевых сплавов в растворе щелочей [4, 5]. Синтезированные ультрадисперсные порошки позволили получить пористые огнеупорные керамические материалы с хорошими механическими свойствами [6, 7]. При этом следует отметить, что при изготовлении порошков по этой методике возникают уникальные сочетания оксидов различных металлов, что может существенно сказываться на электромагнитных свойствах керамических материалов, создаваемых на их основе.

Цель настоящей работы — изучение электрофизических и радиопоглощающих свойств керамических материалов, полученных из продуктов химического диспергирования алюминиево-



В. П. Тарасовский
E-mail: tarasvp@mail.ru

магниевого сплава. Методика получения исходных порошков описана в работах [4–7]. Порошок П1 изготавливали из сплава с 6 мас. % Mg, порошок П2 — из сплава с 12 мас. % Mg, порошок П3 — из сплава с 20 мас. % Mg (табл. 1). В настоящем исследовании использовали порошки, содержащие частицы размерами менее 50 мкм. Из порошков П1, П2 и П3 было изготовлено несколько серий керамических образцов К1, К2 и К3 соответственно. Образцы формовали методом двухстороннего полусухого прессования под давлением 150 МПа. В качестве временного технологического связующего использовали 10 %-ный раствор поливинилового спирта в воде. Образцы имели вид прямоугольных пластин размерами 20×11×2 мм (для исследования электрофизических свойств) и цилиндров диаметром от 10 до 11 мм и высотой от 13 до 15 мм (для исследования радиопоглощающих свойств). Образцы керамики серий К1, К2 и К3 обжигали при 1550 °С, образцы керамики серии К4 — при 1450 °С.

В табл. 1 представлены результаты измерений (усредненных) электрофизических параметров четырех групп образцов керамики. В состав каждой группы образцов входило по три образца, полученных по одному и тому же технологическому процессу. Для металлизации поверхности образцов использовали пасту марки ПП17 на основе серебра. Образцы с нанесенной на их поверхность пастой подвергали термообработке при 850 °С в течение 20 мин. Отклонение численных значений параметров (ϵ , $\text{tg}\delta$, ρ) образцов внутри каждой группы не превышало 10 %.

Из результатов проведенных исследований можно сделать вывод о том, что все керамические материалы являются хорошими диэлектриками [8]. Кроме того, следует отметить, что электрофизические характеристики образцов мало зависят от состава исходного сырья и существенно от кажущейся плотности (открытой пористости) образцов. В табл. 1 для сравнения приведены характеристики керамики марки ВКТ93-1 [9], выпускаемой в настоящее время в России. Образцы керамики из порошков П1, П2 и П3 характеризуются более высокими значениями $\text{tg}\delta$, чем керамический материал марки ВКТ93-1, что указывает на перспективность использования исследуемых материалов в качестве поглотителей СВЧ-энергии.

По данным рентгенофазового анализа (РФА) содержание аморфной фазы в исследуемых образцах составляет менее 5 мас. %. В табл. 2 представлены результаты РФА кристаллических фаз образцов исследуемых керамических материалов. Основной частью кристаллической фазы образцов являются шпинель MgAl_2O_4 и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. При этом либо шпинель, входящая в состав образцов, имеет нестехиометрическую структуру, либо в составе материала обнаруживается кроме благородной шпинели некоторое соединение, изо-

морфное шпинели. Так, в образцах керамики К1 и К2 содержится шпинель нестехиометрической структуры $(\text{Mg}_{0,527}\text{Al}_{0,473})(\text{Al}_{1,758}\text{Mg}_{0,126})\text{O}_4$, а в образцах керамики К3 — изоморфная пара MgAl_2O_4 и Mg_2SiO_4 . Следует отметить хорошее соответствие наших результатов с данными, полученными разными авторами. Различие результатов РФА для образцов керамики К3 можно объяснить тем, что пара MgAl_2O_4 и Mg_2SiO_4 могла интерпретироваться как шпинель нестехиометрической структуры $\text{Mg}_{0,734}\text{Al}_{2,177}\text{O}_4$. Однако результаты РФА, описанные в статье [5] для образцов керамики К1 и К2, не позволяют объяснить наличие радиопоглощающих свойств у этих образцов.

Известно, что удельная энергия электромагнитного поля, расходуемая на нагрев диэлектрика, при прочих фиксированных параметрах прямо пропорциональна произведению $\epsilon \cdot \text{tg}\delta$ [9]. Поэтому можно сделать предположение о том, что все исследуемые керамические материалы должны хорошо поглощать электромагнитную энергию. Однако нельзя однозначно делать выводы о преимуществах того или иного материала на основании измерения только ϵ и $\text{tg}\delta$, так как сами эти величины зависят от температуры и частоты электромагнитного поля. Кроме того, на процесс поглощения энергии могут влиять и магнитные свойства материалов. Поэтому была предпринята попытка непосредственно оценить поглощающую способность исследуемых керамических материалов. Для этого была создана установка на базе бытовой СВЧ-печи мощностью 700 Вт (рис. 1). Размер резонатора $a \times b \times c = 280 \times 190 \times 310$ мм, частота

Таблица 1. Физико-технические и электрофизические характеристики образцов керамики

Группа образцов (порошок)	Открытая пористость, %	ϵ	$\text{tg}\delta$	ρ , 10^{-11} Ом·м
К1 (П1)	30	10	0,5	3
К2 (П2)	25	10	0,5	4
К3 (П3)	25	10	0,6	4
К4 (П4)	53	6	0,3	6
ВКТ93-1	0,02	<12	0,12	<10

Таблица 2. Результаты РФА образцов керамических материалов

Керамика	Состав и массовая доля, %	
	по данным авторов статьи	по данным [5, 7]
К1	$(\text{Mg}_{0,527}\text{Al}_{0,473})(\text{Al}_{1,758}\text{Mg}_{0,126})\text{O}_4$ 45, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 30, $\text{NaMg}_2\text{Al}_{15}\text{O}_{25}$ 15, $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ 10	MgAl_2O_4 37, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 63
К2	$(\text{Mg}_{0,527}\text{Al}_{0,473})(\text{Al}_{1,758}\text{Mg}_{0,126})\text{O}_4$ 85, $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ 15	MgAl_2O_4 85, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 15
К3	MgAl_2O_4 90, Mg_2SiO_4 2, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 3, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 2, SiO_2 3	$\text{Mg}_{0,734}\text{Al}_{2,177}\text{O}_4$ 95, $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ 5

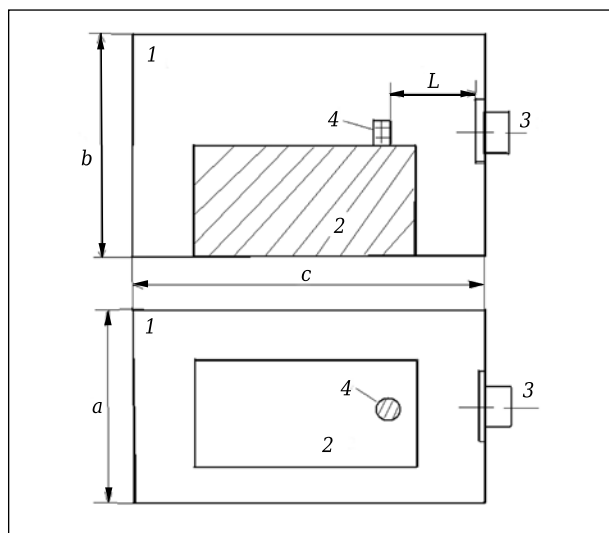


Рис. 1. Схема установки для исследования поглощающих свойств образцов керамики различного состава: 1 — резонатор; 2 — подставка; 3 — генератор; 4 — образец

генератора СВЧ-излучения 2,45 ГГц, т. е. длина волны основной гармоники излучения составляла 123 мм. Внутри резонатора располагалась подставка из теплоизоляционной радиопрозрачной керамики. Образцы устанавливали на этой подставке прямо напротив выхода волновода на расстоянии L от 30 до 100 мм от его торца. Высоту подставки подбирали таким образом, чтобы ось волновода проходила через середину образца. Длительность работы генератора СВЧ-излучения варьировали от 30 до 180 с. При этом в зависимости от расстояния L некоторые образцы нагревали до температуры выше 1000 °С. Степень воздействия СВЧ-излучения оценивали по средней температуре образцов.

Как правило, ввиду низкой теплопроводности материалов и сильной неоднородности электромагнитного поля в резонаторе образцы прогревались неравномерно. Для устранения этого применяли следующую методику измерения средней температуры образцов. После обработки электромагнитными волнами образцы помещали в сосуд с водой. По изменению температуры воды определяли среднюю температуру разогрева образца. Количество воды подбирали таким образом, чтобы прирост температуры составлял от 1 до 10 °С. В этом случае можно было использовать термопару с невысокой точностью измерений (приборная погрешность 0,1 °С) и при этом не учитывать влияние множества факторов, таких как инерционность термопары, нагрев стенок сосуда, тепловое излучение сосуда, испарение воды и т. д. После испытания образцы сушили 30 мин при 120 °С и использовали повторно.

В табл. 3 представлены результаты исследований керамических образцов К5, К6 и К7 из порошков П1, П2 и П3 соответственно. В экспериментах использовали образцы массой от 3,1

до 3,4 г, которые устанавливали на расстоянии $L = (30 \pm 2)$ мм. Длительность работы генератора СВЧ-излучения в этих опытах составляла 60 с. Статистическая погрешность при определении теплоемкости и средней температуры образцов составила примерно 8 %, что вполне достаточно для оценки степени поглощающей способности образцов исследуемых керамических материалов. Из табл. 3 видно, что все образцы хорошо поглощают СВЧ-энергию. Однако при этом следует отметить, что чем меньше доля магния в исходном сплаве, использованном для получения из него порошка, тем выше интенсивность поглощения СВЧ-энергии соответствующими образцами.

Кроме того, при проведении исследований все образцы показали хорошую термостойкость — выдержали без повреждений не менее 12 теплосмен несмотря на то, что в ходе экспериментов наблюдалась значительная неоднородность распределения температуры внутри образцов. Разница между температурой на оси образца и на его поверхности достигала 200 °С. Высокая термостойкость образцов подобных керамических материалов была отмечена также в работе [7].

Далее была оценена скорость нагрева исследуемых образцов керамики. На рис. 2 показана зависимость температуры на оси образца из порошка П2 от длительности работы генератора СВЧ-излучения. Испытания образцов проводили до момента выхода процесса разогрева на стационарный режим. После 200 с температура на оси образцов достигала (920 ± 50) °С (температура на поверхности образца (700 ± 50) °С) и переставала зависеть от времени, т. е. вся поглощаемая образцом энергия переизлучалась в виде тепла. То есть средняя скорость нагрева

Таблица 3. Результаты исследования поглощения СВЧ-энергии керамическими материалами

Группа образцов	Теплоемкость, кДж/(кг·К)	Средняя температура, °С
К5	0,80	196
К6	0,80	161
К7	0,78	132

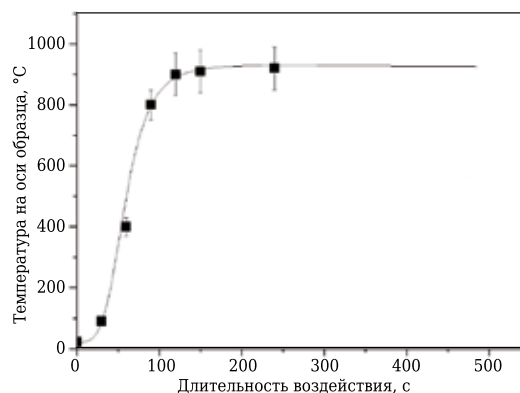


Рис. 2. Зависимость температуры на оси образца от длительности воздействия на образец СВЧ-излучения

составила около 6 °С/с. После остывания образцы не имели видимых повреждений и испытывались повторно. Очевидно, что при использовании более мощного генератора излучения можно было бы добиться еще большего разогрева образцов. Подобные измерения образцов, изготовленных из порошков П1 и ПЗ, дали аналогичные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование электрофизических свойств керамических материалов, полученных из порошков, изготовленных методом химического диспергирования алюминиево-магниевого

сплавов. Продемонстрирована возможность использования этих материалов в качестве объемных поглотителей СВЧ-энергии.

Проведено сравнение характеристик образцов новых материалов и образцов керамики марки ВКТ93-1, выпускаемой в настоящее время в России. Высокая термостойкость исследуемых материалов дает возможность использовать их в качестве теплоизоляционных и огнеупорных материалов в системах, требующих защиты от СВЧ-излучения.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Научные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО «МАМИ».

Библиографический список

1. **Ковнеристый, Ю. К.** Материалы, поглощающие СВЧ-излучения / Ю. К. Ковнеристый, И. Ю. Лазарева, А. А. Раваев. — М. : Наука, 1982. — 164 с.
2. **Ирюшкина, Л. Ф.** Материалы для внутриламповых поглотителей СВЧ-энергии / Л. Ф. Ирюшкина, Н. И. Воробьева : обзор по электронной технике. Сер. 6 // Материалы. — 1988.
3. **Часнык, В. И.** Поглотители СВЧ-энергии на основе нитрида алюминия с высоким уровнем поглощения / В. И. Часнык // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — № 1. — С. 11–14.
4. **Бадаев, Ф. З.** Определение кинетических параметров взаимодействия алюминиево-магниевого сплава с водным раствором гидроксида натрия / Ф. З. Бадаев, В. В. Рыбальченко, А. Х. Хайри [и др.] // Машиностроение и инженерное образование. — 2013. — № 1. — С. 17–20.
5. **Омаров, А. Ю.** Структура и фазовый состав новых керамических материалов, полученных из порошков гидроксида алюминия методом химического диспергирования алюминиево-магниевого сплава / А. Ю. Омаров, Ю. Г. Трифонов // Новые огнеупоры. — 2013. — № 9. — С. 37–40.

Omarov, A. Yu. Structure and phase composition of ceramic materials prepared from aluminum hydroxide powder by chemical dispersion of aluminum-magnesium

alloys / A. Yu. Omarov, Yu. G. Trifonov / Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 362–365.

6. **Шляпин, А. Д.** Исследование структуры и фазового состава алюмооксидных порошков, полученных методом химического диспергирования алюминиевого сплава с различным содержанием магния / А. Д. Шляпин, В. П. Тарасовский, А. Ю. Омаров [и др.] // Стекло и керамика. — 2013. — № 12. — С. 17–20.

7. **Васин, А. А.** Структура и свойства материалов из химически диспергируемого алюминиево-магниевого сплава с повышенным содержанием магния (20 мас. %) : дис. ... канд. техн. наук / А. А. Васин. — М., 2015. — 162 с.

8. **Тарасовский, В. П.** Влияние технологических факторов на характеристики объемных керамических резисторов / В. П. Тарасовский, Е. С. Лукин, А. В. Федотов, И. Б. Широкова // Обмен опытом в радиопромышленности. — 1986. — № 3. — С. 29, 30.

9. **Абдусаламов, В. М.** Основы технологии СВЧ-нагрева полимерных и композиционных материалов / В. М. Абдусаламов, М. М. Безлюдова, И. М. Буланов [и др.] ; под ред. Ю. Л. Шворобья. — М. : ЦНИИ НТИ КПК, 1992. — 168 с. ■

Получено 06.12.15

© С. Г. Пономарев, В. П. Тарасовский, В. И. Кошкин, Ю. М. Боровин, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ЕССМ17 — 17-я европейская конференция по композитам
26–30 июня 2016 г.

г. Мюнхен, Германия

ESCM
EUROPEAN SOCIETY
FOR COMPOSITE MATERIALS



www.eccm17.org