

УДК 519.2:537.226;534.538

*В.И. СУСЛЯЕВ**, *О.В. КАЗЬМИНА***, *Б.С. СЕМУХИН***, *Ю.П. ЗЕМЛЯНУХИН**, *К.В. ДОРОЖКИН****ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПЕНОМАТЕРИАЛА¹**

Рассматривается пенокристаллический материал, обладающий заметным поглощением электромагнитной энергии в КВЧ-диапазоне. Приводятся коэффициенты прохождения и отражения от слоя материала и величины комплексной диэлектрической проницаемости. Показана перспективность использования низкотемпературного стеклогранулята, полученного на основе природного кремнеземсодержащего маршаллита, для облицовки неотражающих помещений и малогабаритных камер

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, безэховая камера, стеклокерамический пеноматериал, поглощение электромагнитной энергии, коэффициенты отражения и прохождения.

Для создания многофункциональных безэховых камер и экранированных помещений требуются малогабаритные, негорючие и экологически чистые поглощающие материалы. Устройства на основе таких материалов также должны обладать удовлетворительными коэффициентами отражения в широком диапазоне частот и высокими прочностными характеристиками. Известно, какие трудности возникают при монтаже и ремонте безэховых камер при использовании элементов, называемых «пирамидами» или «бамбуком», поэтому желательно, чтобы элементы по своим технологическим качествам были максимально приближены к строительным материалам, технология применения которых хорошо разработана. Пеноматериалы относятся к такой категории и достаточно широко применяются в строительстве [1, 2].

Механические свойства пеноматериала определяется его структурой, т.е. размером, формой, однородностью распределения пор, а также толщиной межпоровой перегородки и составом аморфной составляющей. Механическая прочность аморфной фазы значительно повышается в присутствии частиц кристаллической фазы микро- и наноразмеров, то есть без концентрации напряжений на границе раздела фаз, приводящих к разрушению. Получение частиц таких размеров в стекле можно осуществить путем частичной кристаллизации или используя явление микроликвационного расслоения [3, 4].

В данной работе рассмотрен низкотемпературный стеклогранулят, полученный на основе природного кремнеземсодержащего маршаллита. Для получения использована двухстадийная технология, предусматривающая низкотемпературный синтез стеклогранулята при температурах 850–950 °С. По фазовому составу материал представляет собой аморфный материал, содержащий кристаллическую фазу в виде кварца в количестве 10 мас. %. Для сравнения электромагнитных характеристик изготовлен другой материал из природного кремнеземсодержащего маршаллита. Материал получен из стекла, сваренного при температурах 1200–1300 °С, и является полностью аморфным.

На основе измельченных до удельной поверхности 5000 см²/г двух видов порошков (низкотемпературного стеклогранулята и стекла) с добавлением углеродсодержащего газообразователя в количестве 0,5 мас. % приготовлена пенообразующая смесь. В процессе термической обработки которой при температуре 850 °С получены образцы пеностекляных материалов, отличающиеся по физико-механическим характеристикам. Как видно из представленных в таблице данных, материал из низкотемпературного стеклогранулята (далее пеностеклокристаллический материал – ПСКМ), отличается от полностью аморфного пеностекла (ПС) повышенной плотностью и прочностью.

¹ Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.» и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-03-98015-р_сибирь_а) и Европейского гранта 7 Рамочной программы FP7-NMP-2008-SMALL-2 (Proposal No: CP-FP 228536-2 NERNN).

| Образец пеноматериала | Физико-механические характеристики пеноматериала | | | |
|-----------------------|--|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| | Плотность средняя, кг/м ³ | Прочность при сжатии, МПа | Водопоглощение объемное, % | Теплопроводность при 20 °С, Вт/(м·К) |
| ПСКМ | 250 | 3,5 | 3–4 | 0,07–0,08 |
| ПС | 220 | 2,3 | 3–4 | 0,1–0,15 |

Важным показателем структуры ячеистого материала является характер пористости – пространственное расположение пор (упаковка) и их распределение по размерам, толщина межпоровых перегородок. Оптимальным с точки зрения прочности является температурный режим, позволяющий получить структуру материала с размером пор 1–1,5 мм, толщиной межпоровой перегородки 40–50 мкм, равномерным распределением пор по объему.

Образцы, выбранные для исследований, отвечают данным требованиям, но имеют некоторые отличия, связанные с морфологией пор. Форма пор ПСКМ отличается большей степенью деформирования сферических пор в правильные многогранники. Очевидно, изменение формы пор обусловлено неоднородным распределением содержания Si в аморфной матрице перегородки, что было установлено по данным энергодисперсионного анализа.

Измерения электромагнитного отклика от образцов прямоугольной формы толщин 27 мм (ПСКМ) и 29 мм (ПС) произведены на спектрометре терагерцового диапазона СТД-21 [5], в котором используется набор ламп обратной волны и интерферометр Маха – Цандера. Диапазон частот выбран потому, что в более участке 26–36 ГГц стеклокерамические материалы показали хорошие поглощающие свойства [6]. Измерялись модули и фазы коэффициентов отражения R и прохождения T . Для обоих образцов коэффициенты отражения близки к 0, что связано, вероятно, с диффузной поверхностью пористых материалов. Представленный рис. 1 характеризует поглощающие свойства. Коэффициент поглощения $A = 1 - T - R$.

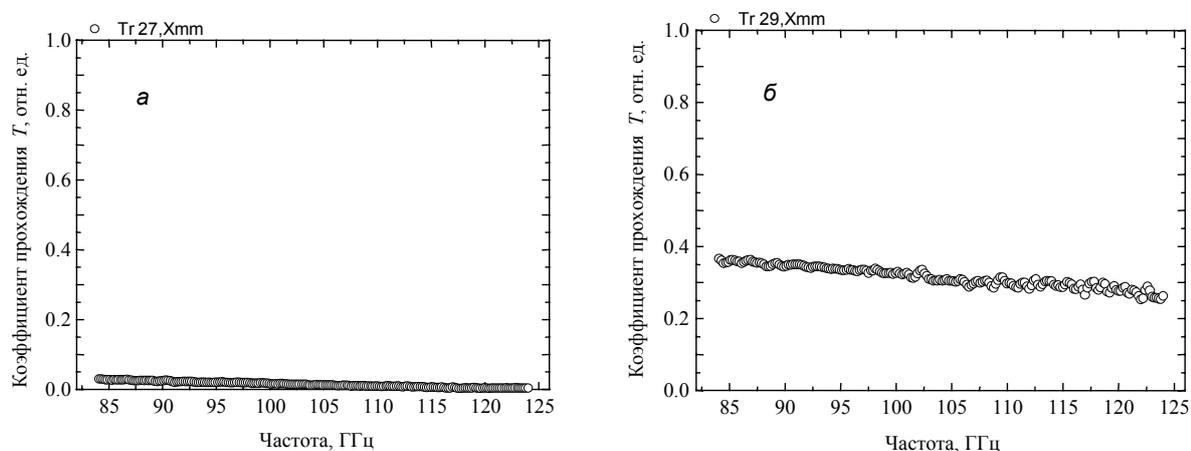


Рис. 1. Коэффициенты прохождения от образцов: *a* – ПСКМ; *б* – ПС

Величина прошедшей мощности через образец ПСКМ значительно меньше, чем через пеностеклоный, хотя их толщины приблизительно одинаковы. Это различие нельзя объяснить различием плотности, так как эксперимент показывает, что поглощающие свойства не полностью определяются количеством вещества, но и структурой изготовленного материала.

Измеренные величины электромагнитного отклика использованы для расчета комплексных значений диэлектрической проницаемости, частотные зависимости которых приведены на рис. 2. Видно, что электродинамические характеристики ПСКМ в большей степени отличаются от окружающей среды, чем от пеностекла. Этому способствует структура и формы пор, которые в ПСКМ существенно отличаются от пеностекла.

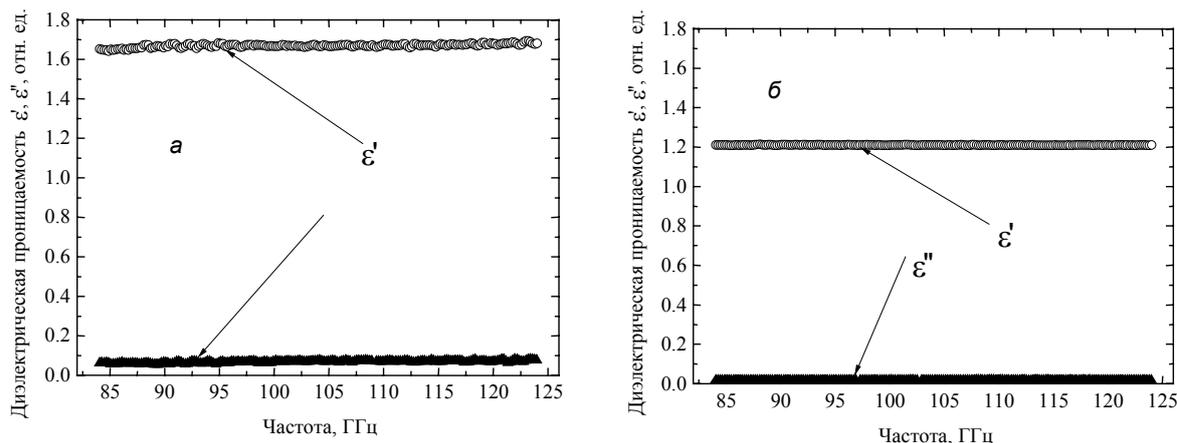


Рис. 2. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости образцов: *a* – ПСКМ; *б* – ПС

Проведенные исследования показали, что низкотемпературный стеклогранулят, полученный на основе природного кремнеземсодержащего маршаллита, обладает повышенной способностью поглощать электромагнитную энергию, более высокой прочностью и пониженной теплопроводностью. Такие материалы перспективны для использования в качестве облицовочного материала как крупных неотражающих помещений, так и малогабаритных безэховых камер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щепочкина Ю.А. Сырьевая смесь для изготовления пожаробезопасного отделочного материала // Патент РФ № 2465234.
2. Абияка А.Н., Верещагин В.И., Казьмина О.В. Способ получения гранулята для производства пеностекла и пеностеклокристаллических материалов // Патент РФ № 2326841.
3. Казьмина О.В., Верещагин В.И., Семухин Б.С. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 1. – С. 2–4.
4. Казьмина О.В., Верещагин В.И. Семухин Б.С. // Физика и химия стекла. – 2011. – Т. 37. – № 4. – С. 29–36.
5. Суляев В.И., Дунаевский Г.Е., Емельянов Е.В., Кулешов Г.Е. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 9. – С. 53–59.
6. Суляев В.И., Казьмина О.В., Семухин Б.С. и др. // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 159–161.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 20.07.12.

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия
E-mail: susl@mail.tsu.ru

Суляев Валентин Иванович, к.ф.-м.н., доцент;
Казьмина Ольга Викторовна, д.т.н., профессор;
Семухин Борис Семенович, д.т.н., ведущ. науч. сотр.;
Землянухин Юрий Петрович, аспирант;
Дорожкин Кирилл Валерьевич, аспирант.