

УДК 620.168.001.2

К. ф.-м. н. М. В. ДМИТРИЕВ, к. т. н. И. Н. ЕРИМИЧОЙ, к. т. н. Л. И. ПАНОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: panov.leonid@gmail.com

ПРОГНОЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СТЕКЛОКЕРАМИКЕ ДЛЯ РАЗНЫХ СООТНОШЕНИЙ МАССОВЫХ ДОЛЕЙ КОМПОНЕНТОВ

Предложен инженерный метод прогнозирования диэлектрических потерь в двухкомпонентной стеклокерамике без пор, позволяющий при ее разработке сократить время и средства на проведение экспериментов и расчетов.

Ключевые слова: стеклокерамика, диэлектрические потери, комплексный метод исследования, ускорение разработки композитов.

К числу перспективных диэлектриков относится стеклокерамический композит (**СК**) [1], который обладает достоинствами композиционных и керамических материалов и представляет собой стеклянную матрицу с включениями тугоплавких частиц $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Он экспрессно спекается при 800–900°C и успешно конкурирует с энергоемкой алюмооксидной керамикой в изделиях радиоэлектроники, поскольку имеет лучшие технические характеристики и технологические преимущества. Отсутствие в нем пор позволяет точнее воспроизводить его параметры и повысить процент выхода годных изделий.

При разработке СК лишь экспериментальными методами затраты времени на проведение опытов для выбора оптимального варианта столь велики, что результат поиска морально устаревает, проигрывая в рыночной конкуренции. Это связано с тем, что число факторов, неоднозначно влияющих на свойства синтезируемого СК, очень велико. К ним относятся состав и свойства применяемого стекла, свойства наполнителя, технологические режимы изготовления компонентов и композита, чистота используемых материалов и другие.

В доступных источниках опубликованы лишь конечные результаты изготовления СК, а информация о способах ускорения разработки таких материалов практически отсутствует. Однако создание новых методов, совмещающих эксперимент и теорию, которые позволили бы сократить долю длительных и дорогостоящих опытов и тем самым обеспечивали бы конкурентоспособность создаваемых СК, является актуальной на сегодняшний день задачей.

Целью настоящей работы было создание простого, пригодного для инженерных расчетов метода прогнозирования эффективной величины тангенса угла диэлектрических потерь (**ТУДП**)

в СК ($\text{tg}\delta_k$) для различного соотношения массовых долей компонентов. В задачу входило получение формулы для вычисления $\text{tg}\delta_k$, в которую входили бы только те параметры, которые можно измерить, а не рассчитывать с помощью дополнительных методов.

Рассматриваемый диэлектрик представляет собой неупорядоченную систему, состоящую из статистической смеси компонентов, не вступающих в химическую реакцию. При решении поставленной задачи учитывалось следующее:

- эффективные диэлектрические параметры компонентов СК изменяются после спекания;
- свойства образцов используемого стекла после спекания в составе СК в присутствии частиц наполнителя отличаются от свойств отдельно спеченных образцов того же стекла;
- тангенс угла диэлектрических потерь изучаемого СК можно измерить.

В [2] было показано, что эффективный диэлектрический параметр D керамического материала сложного состава, пластических масс, компаундов с наполнителем и некоторых других материалов достаточно точно можно определить по формуле, предложенной К. Лихтенеккером и получившей название логарифмического закона смешивания:

$$\ln D = \sum_{i=1}^n y_i \ln D_i, \quad (1)$$

где y_i , D_i — объемная доля и диэлектрический параметр i -го компонента в составе композита.

Для $\text{tg}\delta_k$ рассматриваемого СК формула (1) принимает вид

$$\ln \text{tg}\delta_k = y_c \ln \text{tg}\delta_c + y_n \ln \text{tg}\delta_n, \quad (2)$$

где y_c , y_n и $\text{tg}\delta_c$, $\text{tg}\delta_n$ — объемные доли и ТУДП стекла и наполнителя в составе СК соответственно.

Поскольку в формулу (2) входят параметры компонентов, которые не могут быть измерены, в соответствии с поставленной задачей ее следует трансформировать.

Для замены неизмеряемых объемных долей компонентов y_i на измеряемые массовые доли m_i воспользуемся формулой, приведенной в [3, с. 33] для n -компонентного композита:

$$y_i = \frac{m_i}{p_i} / \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{p_i}, \quad (3)$$

где p_i — плотность i -го компонента.

Воспользовавшись этой формулой, для стекла и наполнителя в составе исследуемого СК можно, соответственно, записать

$$y_c = \frac{m_c p_n}{m_c p_n + m_n p_c}; \quad (4)$$

$$y_n = \frac{m_n p_c}{m_c p_n + m_n p_c} \quad (5)$$

и тогда с учетом этого преобразовать формулу (2) к следующему виду:

$$\ln \operatorname{tg} \delta_k = \frac{m_c p_n \ln \operatorname{tg} \delta_c + m_n p_c \ln \operatorname{tg} \delta_n}{m_c p_n + m_n p_c}. \quad (6)$$

Теперь решим задачу исключения из этой формулы неизмеряемых параметров $\operatorname{tg} \delta_c$ и $\operatorname{tg} \delta_n$. Поскольку их значения не зависят от состава СК, для двух образцов, изготовленных при одинаковых режимах спекания, в соответствии с формулой (2) можно записать

$$\ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 1} = y_{c1} \ln \operatorname{tg} \delta_c + y_{n1} \ln \operatorname{tg} \delta_n; \quad (7)$$

$$\ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 2} = y_{c2} \ln \operatorname{tg} \delta_c + y_{n2} \ln \operatorname{tg} \delta_n. \quad (8)$$

Решим систему этих двух уравнений относительно искомых параметров и получим

$$\ln \operatorname{tg} \delta_c = \frac{y_{n1} \ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 2} - y_{n2} \ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 1}}{y_{n1} y_{c2} - y_{n2} y_{c1}}; \quad (9)$$

$$\ln \operatorname{tg} \delta_n = \frac{y_{c1} \ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 2} - y_{c2} \ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 1}}{y_{c1} y_{n2} - y_{c2} y_{n1}}. \quad (10)$$

Для упрощения расчетных формул выберем случай, когда $m_{c2} = m_{n2}$. Тогда из формул (9) и (10), с учетом (4) и (5), после ряда преобразований получим

$$\ln \operatorname{tg} \delta_c = [(p_c + p_n) m_{n1} \ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 2} - (m_{n1} p_c + m_{c1} p_n) \ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 1}] / [p(m_{n1} - m_{c1})]; \quad (11)$$

$$\ln \operatorname{tg} \delta_n = [(p_c + p_n) m_{c1} \ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 2} - (m_{n1} p_c + m_{c1} p_n) \ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 1}] / [p_c(m_{c1} - m_{n1})]; \quad (12)$$

Представим эти выражения в виде

$$\ln \operatorname{tg} \delta_c = \frac{B m_{n1} - C}{p_n (m_{n1} - m_{c1})} = \frac{G_1}{p_n}; \quad (13)$$

$$\ln \operatorname{tg} \delta_n = \frac{B m_{c1} - C}{p_c (m_{c1} - m_{n1})} = \frac{G_2}{p_c}, \quad (14)$$

где $B = (p_c + p_n) \ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 2}$;

$C = (m_{n1} p_c + m_{c1} p_n) \ln \operatorname{tg} \delta_{\alpha 1}$;

$G_1 = (B m_{n1} - C) / (m_{n1} - m_{c1})$;

$G_2 = (B m_{c1} - C) / (m_{c1} - m_{n1})$.

В результате, из формулы (6), с учетом (13) и (14), получим выражение для расчета $\operatorname{tg} \delta_k$ в соответствии с поставленной задачей:

$$\ln \operatorname{tg} \delta_k = \frac{m_c G_1 + m_n G_2}{m_c p_n + m_n p_c} = \frac{\frac{m_c}{m_n} G_1 + G_2}{\frac{m_c}{m_n} p_n + p_c}. \quad (15)$$

Для проверки достоверности результатов, получаемых с помощью формулы (15), были проведены измерения необходимых параметров двух образцов композитов с разными долями стекла и наполнителя, изготовленных в одинаковых технологических условиях (спекание в течение 0,5 ч при 900°C) в соответствии с [1]. При этом для соответствия условиям получения формулы для расчетов один из выбранных образцов имел в своем составе одинаковые массовые доли стекла и наполнителя ($m_{c2} = m_{n2} = 0,5$). Плотность компонентов определяли с помощью пикнометра и аналитических весов, ТУДП образцов определены измерителем Е7-12 на частоте 1 МГц. Результаты измерений приведены в **табл. 1**.

Таблица 1

Результаты измерений параметров двух образцов СК

Массовые доли компонентов в образцах				Плотность компонентов		ТУДП образцов	
m_{c1}	m_{n1}	m_{c2}	m_{n2}	p_c , кг/м ³	p_n , кг/м ³	$\operatorname{tg} \delta_{\alpha 1}$	$\operatorname{tg} \delta_{\alpha 2}$
0,4	0,6	0,5	0,5	2,97±0,3	3,70±0,3	0,00015	0,00027

Далее с использованием этих экспериментальных данных были рассчитаны значения B , C , G_1 и G_2 , и тогда рабочая формула для прогнозирования $\operatorname{tg} \delta_k$ приняла вид

$$\ln \operatorname{tg} \delta_k = \frac{\frac{m_c}{m_n} \cdot (-20814) - 3395}{\frac{m_c}{m_n} \cdot 3700 + 2970}. \quad (16)$$

В **табл. 2** приведены результаты расчета $\operatorname{tg} \delta_k$, выполненного по формуле (16) в диапазоне m_c/m_n от 0,34 до 3,33 с произвольно задаваемым шагом.

Если считать, что в рассматриваемом СК плотноупакованные частицы наполнителя соответ-

Таблица 2
Результаты $\text{tg}\delta_k$ для разных величин m_c/m_n

m_c/m_n	$\text{tg}\delta_k$	m_c/m_n	$\text{tg}\delta_k$	m_c/m_n	$\text{tg}\delta_k$
0,34	0,00006	0,56	0,00012	1,25	0,00037
0,37	0,00007	0,62	0,00014	1,67	0,00054
0,42	0,00008	0,71	0,00016	2,00	0,00068
0,45	0,00009	0,83	0,00021	2,50	0,00088
0,50	0,00010	1,00	0,00027	3,33	0,00116

ствуют реальным зернистым системам с частицами практически шаровой формы, то согласно [3, с. 13] минимальная объемная доля пространства между такими частицами составляет величину, равную 0,30. В нашем случае эта величина соответствует минимально допустимой объемной доле сплошной объемной матрицы. Согласно формуле (4) этой величине соответствует отношение m_c/m_n , равное 0,34. Сравнение результатов расчета $\text{tg}\delta_k$ при $m_c/m_n=1$ и $m_c/m_n=0,71$ с экспериментальными данными табл. 1 показывает их совпадение в первом случае и хорошее согласование во втором, что также подтверждает достоверность результатов расчета при использовании полученной формулы.

Таким образом, предложен простой инженерный метод прогнозирования тангенса угла диэлектрических потерь в двухкомпонентном СК без пор для широкого диапазона массовых долей компонентов. Полученная формула для вычисления $\text{tg}\delta_k$ содержит только измеряемые параметры, причем те, что обычно используются разработчиками композиционных материалов — массовые навески и плотность компонентов, ТУДП композитов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. А. с. 1782947 СССР. Стеклокерамический материал / Л. В. Бурян, М. В. Дмитриев, В. Д. Лемза, Л. Н. Тартаковская. — 1992. — Бюл. № 47. [A. s. 1782947 SSSR. / L. V.

Buran, M. V. Dmitriev, V. D. Lemza, L. N. Tartakovskaya. 1992. Byul. N 47]

2. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрические потери в стеклокерамике // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1998. №1. — С. 39—43. [Dmitriev M. V. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 1998. N1. P. 39]

3. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — Ленинград: Энергия, 1974. [Dul'nev G. N., Zarichnyak Yu. P. Teploprovodnost' smesei i kompozitsionnykh materialov. Leningrad: Energiya, 1974]

Дата поступления рукописи
в редакцию 02.04 2012 г.

Dmitriev M. V., Yerimichoy I. N., Panov L. I.
Dielectric loss prediction in glass-ceramics for different correlation of mass shares of components.

Keywords: glass ceramic, dielectric loss, multimeter research method, accelerated composites development.

An engineering method for predicting the dielectric loss in two-component non-porous glass ceramic has been proposed. The method allows to reduce the time and expense for conducting experiments and calculations during the design of such glass ceramic.

Ukraine, Odessa national polytechnic university.

Дмитрієв М. В., Єримічой І. М., Панов Л. І.
Прогноз діелектричних втрат у склокераміці для різних співвідношень масових часток компонентів.

Ключові слова: склокераміка, діелектричні втрати, комплексний метод дослідження, прискорення розробки композитів.

Запропоновано інженерний метод прогнозування діелектричних втрат у двокомпонентній склокераміці без пор, що дозволяють скоротити термін розробки і кошти на експеримент та розрахунки.

Україна, Одеський національний політехнічний університет.

І І А Æ Ä Ê Ì È Æ

І І А Æ Ä Ê Ì È Æ



Шарапов В. М., Полищук Е. С., Кошевой Н. Д., Ишанин Г. Г., Минаев И. Г., Совлуков А. С. Датчики. — Москва: Техносфера, 2012. — 624 с.

В книге изложены теоретические основы, принципы действия, описаны конструкции и характеристики датчиков физических величин. Книга предназначена для научных работников, студентов, аспирантов, специалистов в области разработки датчиков, измерительных приборов, элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.

