

## СТЕАТИТОВАЯ КЕРАМИКА С ЗАДАНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ СТАТОРА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

П. Г. УСОВ, В. Н. ГУРИНА, Ю. И. АЛЕКСЕЕВ

(Представлена научным семинаром кафедры технологии силикатов)

Одним из основных рабочих органов электростатического генератора (ЭСГ) является слабопроводящий статор [1, 2], служащий для задания определенного закона распределения напряжения между индукторами. Свойства материала статора должны отвечать определенным требованиям (табл. 1). В качестве материала для такого статора используют чаще всего обычное известково-натровое стекло [2], однако присутствие в конструкции агрегата деталей из стекла не обеспечивает в достаточной степени надежности его работы: стекло обладает повышенной поверхностной электропроводностью при температуре среды ниже (100—120°C) и легко подвержено разрушению при вибрациях машины. В связи с этим и рядом других факторов в работе исследована возможность замены стеклообразного материала статора на керамический, обеспечивающий необходимый комплекс стабильных электрических свойств и обладающий высокой механической прочностью.

В качестве объекта исследований выбрана стеатитовая керамика, соответствующая по допускаемому ГОСТом 5458—64 нижнему пределу электрических свойств предъявляемым требованиям. Но радиокерамическая промышленность выпускает в настоящее время керамику с улучшенными электрическими свойствами, по всем показателям превышающую требования ГОСТа (табл. 1).

Таким образом, целью работы было получение стеатитовой керамики с заданным значением электрических параметров.

Известно, что свойства керамического материала, сложенного кристаллической и стекловидной фазами, определяются в основном составом

Таблица 1

Основные требования к материалу статора и свойства стеатитовой керамики

Свойства	Требуемые значения	Стеатитовая керамика	
		по ГОСТу 5458—64	действительные
Удельное объемное сопротивление, $\rho_v$ ом·см при 20°C	$10^{12} \div 10^{14}$	не менее $10^{12}$	$10^{16}$
Электрическая прочность, $E_{пр}$ кВ/мм	20—25	не менее 20	25—30
Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	6	не более 7,5	6,9
Предел прочности при сжатии, $\sigma_{сж}$ кГ/см <sup>2</sup>	2000		3000
Коэффициент линейного термического расширения, $\alpha$ 1/град 10 <sup>6</sup>	5—8	6—8	6

Таблица 2

## Химический состав исходных материалов, в вес %

Компонент	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	BaO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	п. п. п.	Σ
Тальк онотский сорт «Экстра»	62,02	31,64	0,45	0,45	0,42	—	—	—	—	4,78	99,76
Тальк онотский сырой с повышенным содержанием примесей	60,12	31,56	1,09	0,86	0,77	—	—	—	—	5,56	99,96
Глина Часов-Ярская	50,76	0,63	1,16	32,38	0,84	—	1,16	3,86	—	9,26	100,05
BaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	77,66	—	—	—	22,34	100

и количеством аморфной фазы; свойства же кристаллофазы практически постоянны и, как правило, значительно выше свойств стекла.

Стекловидная фаза стеатитовой керамики слагается из продуктов разложения глинистого минерала и плавня, в качестве которого используется углекислый барий (табл. 2). Электрические свойства стекол находятся в сложной зависимости от состава и трудно поддаются даже ориентировочному расчету, в связи с чем подбор составов стеклофазы для получения керамики с заданными свойствами носит экспериментальный характер и основывается на общих представлениях о влиянии состава и соотношения окислов различных групп в стекле. Исследовано несколько составов масс с различным содержанием глинистого компонента и углекислого бария. Тальк сорта «экстра», используемый в производстве стеатитовой керамики, заменен тальком с повышенным содержанием примесей (табл. 2). Шихтовые составы масс, выбранных для исследования, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Шихтовые составы исследуемых масс, в вес %

Наименование компонентов	Содержание компонентов			
	промышленный состав	С-I	С-II	С-III
Тальк онотский сырой	38	80	80	75
Тальк онотский обожженный	42	—	—	—
Глина Часов-Ярская	5	5	10	15
Углекислый барий	15	15	10	10

В качестве основного контролируемого электрического свойства массы принята величина удельного объемного сопротивления ( $\rho_v$ ). Объемное сопротивление диэлектрика меньше подвержено воздействию случайных факторов (наличие гидратных пленок на поверхности, возможность протекания окислительно-восстановительных реакций с окружающей газовой средой), чем поверхностное сопротивление ( $\rho_s$ ).

В бариевых алюмосиликатных стеклах, какими представлена стеклофаза стеатитовой керамики, электропроводность обусловливается главным образом наличием примесей, среди которых существеннейшее значение принадлежит щелочам и окислам переменной валентности ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Катионы щелочноземельной группы ( $\text{Ba}^{++}$ ) практически не участвуют в переносе тока в твердых телах, положительное действие их заключается в «подавлении» активности щелочей, обеспечивающих ионную проводимость стекол. В бесщелочных стеклах резкое снижение объемного сопротивления вызывает присутствие окислов железа в результате сильно выраженной электронной проводимости. При совместном присутствии щелочей и окислов железа электронная проводимость уменьшается, однако в присутствии  $\text{Al}_2\text{O}_3$  такое действие щелочей «нейтрализуется» [3].

Приведенные данные свидетельствуют о сложном и не поддающемся точным прогнозам взаимном влиянии компонентов на электрические свойства стекол. В механизме переноса тока в стеклах принимают участие электроны и ионы, основным фактором при этом является концентрация ионов и их ионный радиус. В связи с этим для анализа состава стеклофазы исследуемых масс принято выражение его в молярных процентах (табл. 4).

Из данных, приведенных в табл. 4, следует, что изменение содержания окислов, ответственных за электропроводность стекловидной фазы, осуществляется в основном за счет щелочного иона  $\text{K}^+$ . Содержание окислов железа практически поддерживается постоянным, так как по существующей технологии керамика обжигается в окислительной среде, а

Таблица 4

## Химический состав стеклофазы исследуемых масс, мол. % (расчетный)

Состав	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	BaO	Сумма
Промышленный	68,79	0,24	0,22	0,45	6,12	0,57	23,57	99,96
С-I	63,7	0,24	3,61	1,72	6,88	0,95	23,00	100,1
С-II	68,8	0,38	3,36	1,65	10,5	1,65	13,66	100,0
С-III	68,2	0,50	2,90	1,46	12,8	2,26	11,90	100,02

для создания электронной проводимости за счет окислов железа необходимо совместное присутствие Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и FeO в соотношении Fe<sup>+++</sup>/Fe<sup>++</sup> меньше 4,6 [3], т. е. обжиг керамики в восстановительной среде.

Керамика изготавливалась по спековой технологии, образцы для исследования прессовались в стальных прессформах под удельным давлением 750 кг/см<sup>2</sup> из порошка, пластифицированного парафином с добавкой поверхностноактивных веществ. Образцы подвергались утельному (в засыпке) и окончательному обжигам. Микроструктура керамики всех составов характеризуется достаточной однородностью.

Кристаллическая фаза представлена протоэнстатитом со средней величиной зерна (2—6 мкм). Стекло равномерно окружает зерна протоэнстатита, самостоятельных скоплений не образует. Соотношение кристаллической и стекловидной фаз исследованных составов керамики находится в пределах (6,5—7) : (3—3,5). Свойства керамики, изученные на стандартных образцах по методикам, соответствующим требованиям ГОСТа 5458—64, приведены в табл. 5.

Таблица 5

## Свойства керамики исследованных составов

Свойства	Промышленный	С-I	С-II	С-III
Температура обжига, °C	1280	1280	1270	1260
Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	3,1	3,0	2,8	2,7
Водопоглощение, %	0	0	0	0
Предел прочности при сжатии, δ <sub>сж</sub> кг/см <sup>2</sup>	3000	2200	2600	2500
Электрическая прочность, E <sub>пр</sub> кВ/мм	25—30	23	22	21,5
Удельное объемное сопротивление, ρ <sub>v</sub> ом·см при (t°C)				
100	0,9·10 <sup>16</sup>	2,3·10 <sup>15</sup>	2,0·10 <sup>14</sup>	3,1·10 <sup>13</sup>
200	6,1·10 <sup>15</sup>	0,5·10 <sup>14</sup>	1,4·10 <sup>13</sup>	3,0·10 <sup>12</sup>
Тангенс угла диэлектрических потерь, tgδ·10 <sup>-4</sup> на частоте 1 мГц при (t°C)				
20	4	5	4,8	5,1
100	7	6	7,5	6,2
200	8	7	9	8
Диэлектрическая проницаемость, ε, f = 1 мГц, при 20°C	6,0	5,9	6,1	6,0
Коэффициент термического расширения КТР·10 <sup>-6</sup> 1/град. (t°C) 20÷200	7,2	6,1	6,0	6,2

Из анализа данных, приведенных в табл. 5, следует, что наиболее полно удовлетворяет поставленным требованиям керамика состава С-111. Значение параметра удельного объемного сопротивления этого состава керамики, полученное опытным путем, удовлетворительно согласуется с расчетным, произведенным по формуле [3]:

$$\rho_v = A_p \cdot e^{\frac{U_p}{2 \cdot K \cdot T}}$$

где  $\rho_v$  — удельное объемное сопротивление, Ом·см;

$K$  — постоянная Больцмана;

$T$  — абсолютная температура, °К.

$A_p$ ,  $U_p$  — константы для данного свойства и данного стекла. Для состава С-111 температурная зависимость определяется константами  $A_p = 10^7$ ;  $U_p = 15,1 \cdot 10^{-20}$ .

Таким образом, выявлена возможность регулирования электрических свойств стеатитовой керамики путем вариации состава стекловидной фазы. Получена керамика, состав и свойства которой удовлетворяют требованиям для статора электрического генератора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Кононов. Исследование электростатического генератора дискового типа с проводящими транспортерами. Диссертация, Томск, 1967.
2. В. И. Левитов, А. Г. Ляпин. Электростатические генераторы с жестким ротором. Ч. I и II ЦИНТИ электропром, М., 1963, 1965.
3. А. А. Аппен. Химия стекла. Л., Изд. «Химия», 1970.