

системы, в зависимости от вида применяемого магнийсодержащего компонента, а также температуры обжига находятся в достаточно широком интервале: при температуре 1100 °С – 32,0–101,5 МПа; 1150 °С – 34,8–108,7 МПа; при 1200 °С – 47,7–117,6 МПа.

Повышение механической прочности материалов обусловлено интенсификацией процессов фазообразования, причем главенствующую роль играют, в основном, муллит и кордиерит, обеспечивающие достаточно неплохие физико-химические свойства. Кроме того, увеличение содержания образующегося при термообработке расплава, насыщаемого тугоплавкими и огнеупорными компонентами, его проникающая способность, приводящая к цементированию отдельных агрегатов массы в одну керамическую матрицу, также способствует образованию более плотной структуры с необходимым набором механических характеристик.

Значения ТКЛР синтезированных образцов находятся в достаточно широком пределе значений от 0,12 до  $4,62 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , что говорит о важной роли используемых компонентов на процессы, протекающие при обжиге керамики, и, прежде всего, на формирование фазового состава. Использование оксида лития, введенного  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , оказывает положительное влияние на формирование низкорасширяющихся кристаллических фаз, что способствует повышению термостойкости материала.

Согласно данным рентгенофазового анализа, фазовый состав керамики представлен: кордиеритом  $\text{Mg}_2\text{Al}_3[\text{AlSi}_5\text{O}_{18}]$ , муллитом ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ), корундом  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , низкотемпературным кварцем

( $\text{SiO}_2$ ), кроме того в материале присутствует твердый раствор кордиерита и сподумена сложного состава, шпинель ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), а также в незначительных количествах форстерит ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ).

Таким образом, в работе изучены возможности применения различных магнийсодержащих сырьевых материалов для получения кордиеритсодержащих изделий, проведены исследования свойств, структуры, фазового состава синтезированной керамики, установлены закономерности изменения свойств материала в зависимости от типа применяемого магнийсодержащего сырья, его химического состава, температурно-временных режимов обжига образцов. Оптимизирован состав керамических масс, а также уточнены режимы обжига изделий.

#### Литература

1. Берри Л. Минералогия / Л. Берри, Б. Менсон, Р. Дитрих. – М.: Мир, 1987. – 592 с.
2. Авакумов Г.Н. Кордиерит – перспективный керамический материал / Г.Н. Авакумов, А.А. Гусев. – Новосибирск: Наука, 1999. – 167 с.
3. Балкевич В.Л. Техническая керамика: учеб. пособие для вузов / В.Л. Балкевич. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
4. Мержанов А.Г. СВС-абразивы: производство, свойства, применение / А.Г. Мержанов // Наука – производству. – 1999. – № 10. – С. 5–8.
5. Шихта для изготовления огнеприпаса: пат. 2079467 РФ, МПК<sup>6</sup> С 04В 33/22; 35/195 / И.Р. Невский, И.Ю. Бескова, В.Б. Акименко, М.В. Рябова, Р.П. Савенкова, Л.Р. Харланов, Ю.А. Чашников; заявитель Акционерное общество Конаковский фаянсовый завод «Фаянс». – № 95108366/03; опубл. 20.05.97 // Открытия. Изобрет. – 1997. – № 14. – С. 105–108.

УДК 666.7

### ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ВОЛЛАСТОНИТА

Попов Р.Ю.<sup>1</sup>, Дятлова Е.М.<sup>1</sup>, Самсонова А.С.<sup>1</sup>, Шамкалович В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Электроизоляционные материалы должны обладать комплексом важных технических характеристик: высокой механической и электрической прочностью, термостойкостью, высоким удельным объемным сопротивлением. Часто та-электроизоляционные материалы используются при высоких температурах (электроизоляция печей сопротивления, индуктуров), в этих случаях имеют значения такие свойства как теплопроводность и термическое расширение. Среди большого множества керамических электроизоляционных материалов востребованной является

керамика на основе силикатов и алюмосиликатов кальция.

Метасиликат кальция  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – минерал, известный под названием «волластонит». Это соединение существует в двух модификационных формах:  $\alpha\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – псевдоволластонит и  $\beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – собственно волластонит. Волластонит кристаллизуется в триклинной сингонии, а псевдоволластонит – в псевдогексагональной. При 1125 °С волластонит необратимо переходит в псевдоволластонит с незначительным изменением объема. Температура плавления 1540 °С.

Плотность  $\alpha$ -волластонита  $2,905 \text{ г/см}^3$ , а  $\beta$ -волластонита –  $2,915 \text{ г/см}^3$ . Твердость обеих модификаций, по Моосу, 4,5–6.

Техническую волластонитовую керамику изготавливают из природного волластонита с минимальным содержанием примесей и добавками небольшого количества глины. Температура обжига – 1200–1300 °С. Волластонитовая керамика обладает высокими электрофизическими и механическими свойствами. Для получения изделий технической керамики используют главным образом природное сырье высокой чистоты [2].

Высокая активность к спеканию тонкодисперсной фракции волластонита дает возможность повысить механическую прочность керамики при минимальном содержании спекающей добавки, не снижая термостойкости, а в некоторых случаях вообще отказаться от применения спекающих добавок [3].

Целью данной работы является разработка волластонитсодержащей керамики на основе природного сырья для термо- и электроизоляции индукционных установок.

Разработка керамического волластонитового электроизолятора осуществлялась в двух направлениях. В первом случае использован сравнительно недорогой импортный волластонит, который поставляется в Республику Беларусь для производства облицовочной керамики. В качестве пластификатора использовалась лантненская огнеупорная глина. Поскольку эта глина углистая, она может способствовать некоторой поризации структуры материала. Для снижения теплопроводности материалов, которая играет большую роль при теплоизоляции, в состав масс вводился выгорающий компонент – сапропель (илистые отложения озера «Сергеевское») и вспученный вермикулит. Количество компонентов изменялось в пределах: волластонит (75–85 %), глина лантненская (10–15 %), сапропель (2,5–5 %), вермикулит (2,5–5 %).

По второму направлению использовалось природное сырье Республики Беларусь: в качестве карбонатной составляющей – мел Волковыского месторождения, кварцевыми компонентами являлись кварцевый песок Гомельского ГОК, маршалит (молотый кварцевый песок) и кремнегель (отходы производства фтористого алюминия). Пластифицирующим компонентом являлась лантненская глина. Количество компонентов рассчитывалось исходя из эквимолекулярного соотношения  $\text{CaO}:\text{SiO}_2 = 1:1$ . Экспериментально установлено, что наиболее качественные образцы получаются при использовании в качестве кремнеземистого компонента маршалита. Кварцевый песок не обеспечивает полного взаимодействия между  $\text{CaO}$  и  $\text{SiO}_2$ , остается свободный  $\text{CaO}$ , который при гидратации приводит к разрушению образцов.

Исследованы физико-химические характеристики образцов, установлены их зависимости от исходного состава сырьевых смесей и температуры обжига.

С помощью рентгенофазового анализа и электронной микроскопии изучены фазовый состав и структура керамики. Основной кристаллической фазой в образцах обеих серий является волластонит ( $\alpha\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), а в незначительном количестве присутствует кварц.

Изготовление термостойких электроизоляторов чаще всего осуществляться методом полусухого прессования.

С целью разработки технологических параметров производства изделий было исследовано влияние давления прессования и температуры обжига на свойства образцов волластонитовой керамики оптимального состава, который характеризуется содержанием следующих компонентов, мас. %: природный волластонит – 85, глина огнеупорная – 10, сапропель – 2,5, вермикулит – 2,5.

Изготовление опытных образцов в виде цилиндров диаметром 22 мм осуществлялся методом полусухого прессования при давлениях 10, 20 и 30 МПа. Обжиг материалов проводился при температурах 1100, 1150, 1200 °С с выдержкой 1 час.

Плотность, пористость, водопоглощение синтезированных образцов очень важны, поскольку являются критериальными свойствами, характеризующими степень спекания керамического черепка. Показатели этих свойств коррелируют между собой: водопоглощение и пористость прямо пропорциональны, а кажущаяся плотность по отношению к ним находится в обратно пропорциональной зависимости. Результаты измерения физико-химических свойств приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические свойства опытных образцов

Давление прессования, МПа	Физико-химические свойства опытных образцов при температуре обжига, °С		
	1100	1150	1200
	Водопоглощение, %		
10	24,8	24,4	11,8
20	22,7	19,9	8,7
30	20,7	18,3	5,1
	Кажущаяся плотность, $\text{кг/м}^3$		
10	1670	1680	2110
20	1750	1830	2250
30	1790	1880	2400
	Открытая пористость, %		
10	41,5	41,2	25,0
20	39,8	36,6	19,7
30	37,1	34,4	12,2

Как видно из приведенных данных, водопоглощение, плотность и открытая пористость об-

разцов зависят не только от температуры спекания, но и от давления прессования изделий.

Установлено, что с увеличением температуры обжига от 1 100 до 1 200 °С открытая пористость и водопоглощение уменьшается, поскольку усадка образцов увеличивается вследствие более полного спекания, нарастания количества жидкой фазы и сближения частиц под действием капиллярных сил и сил поверхностного натяжения. В первую очередь растворяются мелкие кристаллы и выпуклые участки других кристаллов, осуществляется перенос веществ через расплав, при этом укрупняются кристаллы, сглаживаются их поверхности, что обеспечивает уплотнение системы и увеличение усадки с ростом температуры обжига. Жидкая фаза заполняет поры, что приводит к уменьшению пористости и водопоглощения [4].

С повышением температуры обжига плотность образцов увеличивается. Это обусловлено более полным протеканием процесса спекания.

Механическая прочность керамики зависит не только от общей пористости, но и от размера пор, равномерности их распределения. С повышением пористости механическая прочность керамики уменьшается за счет увеличения дефектности структуры и снижения прочности связей.

Механическая прочность при изгибе материалов, полученных на основе масс исследуемой системы и обожженных при температуре 1200 °С, находится в пределах 39,07–52,36 МПа, при температуре 1150 °С – 20,56–30,87 МПа. Повышение механической прочности материалов обусловлено интенсификацией процессов образования кристаллических фаз, обеспечивающих вы-

сокие физико-химические свойства, а также увеличением количества образующегося при термообработке расплава, который способствует заполнению пор, цементированию керамической матрицы образцов и формированию более плотной структуры синтезированной керамики [4].

На основании проведенных исследований установлено влияние давления прессования и температуры обжига на критериальные свойства и механическую прочность образцов. Установлено, что с достаточно высокой прочностью качественные образцы могут быть получены при давлении 20 МПа и температуры обжига 1 100–1 150 °С.

Разработанный материал характеризуется высоким удельным электрическим сопротивлением ( $10^{10}$ – $10^{11}$  Ом · м) и низкими диэлектрическими потерями ( $\text{tg}\delta$  при 1 МГц и 20 °С составляет менее  $20 \cdot 10^{-4}$ ).

#### Литература

1. Балкевич В.Л. Техническая керамика: учеб. пособие для вузов / В.Л. Балкевич. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1984. – 255 с.
2. Волочко А.Т. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы / А.Т. Волочко, Е.М. Дятлова. – Минск, 2013. – 383 с.
3. Русанова Л.Н. Керамика из природного воллатсонита для литейных установок алюминиевой промышленности / Л.Н. Русанова [и др.]; под общ. ред. Л.Н. Русановой. – ФГУП «ОНПП «Технология», г. Обнинск Огнеупоры и техническая керамика. 2008. – № 5. – С. 45–47.
4. Августинник А.И. Керамика / А.И. Августинник. – Л.: Стройиздат, 1975. – С. 592.

УДК 53.088:620.179.14

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ДВУХПАРАМЕТРОВОГО МАГНИТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ СТАЛЕЙ

Сандомирский С.Г.

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

Важным физическим параметром стали является твердость – свойство материала оказывать сопротивление пластической деформации при контактном воздействии в поверхностном слое. Для характеристики твердости термически обработанной стали чаще всего используют твердость HRC по Роквеллу. Важность этого параметра определяется и тем, что твердость металла находится в тесной связи с его механическими свойствами [1]. Значит, неразрушающий метод определения твердости стали позволит контролировать весь комплекс ее механических свойств.

Магнитный структурный анализ заключается в неразрушающем определении физико-механических свойств сталей и чугунов по ре-

зультату измерения их магнитных параметров. Поэтому измерения магнитном структурном анализе являются косвенными. Физическая основа наличия связей между физико-механическими и магнитными свойствами в том, что эти свойства (каждое – по своему) определяются структурой металла. Связи между механическими и магнитными параметрами сталей подвержены влиянию случайных факторов и имеют не функциональный, а корреляционный характер. На коэффициент R корреляции между результатами прямых и косвенных измерений механических свойств влияют и погрешности измерения магнитных параметров [2].

В [2] показано, что сверх высокие коэффициенты R корреляции между результатами расчета