

использовать процессор для обработки измеренных сигналов, характеризующих магнитное и ультра-звуковое излучение. Цифровая фильтрация измеренных сигналов обеспечивает стабильное излучение при изменении нагрузки в ходе лечебной процедуры и уменьшает влияние случайных погрешностей. Процессор дает возможность реализовать пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор с целью получения точной и быстрой подстройки генерируемых сигналов и в результате повышает эффективность преобразования электрических сигналов в излучение.

Несомненно, применение ПЛИС снижает стоимость разработки и модернизации аппаратуры,

требует меньшее количество элементов и увеличивает функциональность аппаратуры.

#### Литература

1. Дедович Н.Н. Разработка аппарата для магнитоультразвуковой терапии / Н.Н. Дедович, А.Ф. Романов // Материалы 11-й МНТК «Приборостроение – 2018», Минск, 2018.
2. [https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/nios2/edh\\_ed\\_handbook.pdf](https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/nios2/edh_ed_handbook.pdf)
3. Н.В. Ефремов, А.А. Бородин. Инструментальные средства проектирования и отладки систем на программируемых кристаллах компании Altera: уч. пособ. – М.: Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана.
4. [http://www.naliwator.narod.ru/nios\\_II.html](http://www.naliwator.narod.ru/nios_II.html)

УДК 666.76

### СИНТЕЗ КЕРАМИЧЕСКИХ ТЕРМОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ В ОБЛАСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗИСТОГО КОРДИЕРИТА

Дятлова Е.М.<sup>1</sup>, Сергиевич О.А.<sup>1</sup>, Колонтаева Т.В.<sup>2</sup>, Тимошенко Н.В.<sup>1</sup>

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

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

**Введение.** В области развития технической керамики актуальной является проблема создания высокотермостойких и износостойких керамических материалов, которые могут использоваться в машиностроительной, электронной, химической, легкой и других отраслях промышленности. Промышленное производство такого рода материалов в настоящее время в республике отсутствует, а изготавливаемые отдельными предприятиями изделия из термостойкой и износостойкой керамики уступают по своим эксплуатационным и экономическим характеристикам зарубежным аналогам. При синтезе высокотермостойкой керамики используют малорасширяющиеся фазы, дополняя их другими структурными составляющими для регулирования критериев термостойкости [1, 2].

Система  $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  не представляет особого интереса для получения огнеупорных материалов в связи с содержанием легкоплавких эвтектик, однако она может быть взята за основу для синтеза термостойких материалов технического назначения с повышенными показателями прочности и износостойкости. Сведения о данной системе и ее особенностях, заключающихся в образовании малорасширяющейся фазы феррокордиерита, а также о синтезе керамических материалов с низким ТКЛР ( $1,8\text{--}2,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) довольно ограничены и представлены в работах [3, 4]. Феррокордиерит образуется при более низких температурах по сравнению с обычным магниевым кордиеритом, что представляет особый интерес к изучению данной системы. Выявлено, что оксид железа принимает активное участие в процессах спекания и формирования железосодержащих

кристаллических фаз (герцинит –  $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , феррокордиерит –  $2\text{FeO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$  и магнетит –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), образуя при этом маловязкие расплавы.

Целью данной работы является проведение исследований в области синтеза керамических материалов технического назначения на основе системы  $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , что позволит в некоторой степени нивелировать недостатки традиционной кордиеритовой керамики. Основными задачами исследования являются синтез образцов керамических материалов в системе  $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , исследование их физико-химических и термомеханических характеристик, установление влияния температуры синтеза и количества исходных компонентов на свойства образцов, исследование поведения массы при нагревании, особенностей фазообразования и формирования структуры опытных образцов оптимального состава.

**Методология.** Керамическая масса готовилась сухим способом путем совместного измельчения определённого количества исходных сырьевых компонентов в планетарной мельнице марки РМ 100 фирмы Netzsch (Германия) в течение 10 мин при скорости вращения барабана 250 об/мин. с последующим магнитным обогащением. Пресс-порошок влажностью 8–10 % с использованием в качестве связки воды или полуводной дисперсии клея поливинилацетата (ПВА) протирался через сито № 05. Прессование лабораторных образцов (цилиндров  $\varnothing 20$  мм и высотой 20 мм, дисков  $\varnothing 16$  мм и высотой 5–10 мм, плиток  $(50 \times 50 \times 5)$  мм и балочек  $(50 \times 8 \times 8)$  мм) осуществлялось на гидравлическом прессе ПСУ–50 при давлении 30–40 МПа. Образцы сушились при

температуре  $100 \pm 5$  °С в сушильной шкафу типа СНОЛ. Обжиг образцов проводился в лабораторной электрической печи типа SNOL 6,7/1300 в температурном интервале 1100–1200 °С со скоростью подъема 150–200 °С/ч и выдержкой при максимальной температуре 1 ч, охлаждение – инерционное.

**Экспериментальная часть.** Содержание оксидов для области составов исходных смесей изменялось в пределах: FeO – от 15 до 25 мас. %,  $Al_2O_3$  – от 40 до 50 мас. %,  $SiO_2$  – от 40 до 50 мас. %. Синтезированные при различных температурах обжига лабораторные образцы имели правильную геометрическую форму без признаков пережога и характеризовались тонкозернистой плотной структурой.

Минимальными значениями водопоглощения (3,6–3,4 %) и открытой пористости (8,7–8,5 %) характеризуются образцы с максимальной температурой обжига. По мере увеличения содержания FeO и, соответственно, снижения самого тугоплавкого оксида  $Al_2O_3$  показатели кажущейся плотности значительно увеличиваются в связи с образованием большего количества расплава при спекании, а также активным формированием железосодержащих кристаллических фаз в исследуемой области системы FeO– $Al_2O_3$ – $SiO_2$ .

Исследование термического расширения опытных образцов во взаимосвязи с исходным составом и температурой обжига показывает их сложную зависимость. Широкий интервал значений ТКЛР образцов ( $3,60$ – $6,46 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ) при температуре измерения 300 °С определяется разным соотношением высокорасширяющейся кварцевой составляющей, кристаллической фазы феррокордиерита, а также образующейся стекловидной фазы. В таблице 1 представлены значения ТКЛР образцов керамических материалов в зависимости от температуры их синтеза.

Таблица 1 – Значения ТКЛР опытных образцов керамических материалов

Температура обжига, °С	Номер образцов, ТКЛР, $\alpha \cdot 10^{-6} K^{-1}$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1100	4,46	4,45	5,17	5,14	5,48	6,40	5,37	6,10	6,46
1150	4,12	4,05	4,78	4,67	5,35	5,84	4,98	5,68	6,08
1200	3,87	3,60	4,31	4,10	4,98	5,54	4,55	5,17	5,68

При повышении содержания FeO показатели ТКЛР снижаются за счет увеличения доли выделенной малорасширяющейся фазы феррокордиерита в структуре спеченного материала. Минимальным значением ТКЛР ( $3,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ) характеризуется состав № 2, наиболее близко расположенный к точке кристаллизации фазы железистого кордиерита. Увеличение температуры обжига до 1200 °С приводит к снижению ТКЛР для всех исследуемых составов, что обусловлено интенсивным выделением феррокордиерита, а

также снижением количества кварцевой составляющей. Наиболее высокие значения ТКЛР для образцов составов № 6 и 9 характерны для образцов с наименьшим содержанием FeO, что вероятно определяется формированием других более высокорасширяющихся алюмосиликатных фаз.

Установлено, что с повышением температуры обжига за счет активизации процесса спекания и снижения пористости происходит увеличение механической прочности при сжатии образцов до 50 МПа. На механическую прочность образцов оказывают большое влияние химический состав смесей и расположение составов на диаграмме FeO– $Al_2O_3$ – $SiO_2$  эвтектических точек и пограничных линий. Максимальными значениями механической прочности обладает образец № 2, более близко расположенный к точке кристаллизации феррокордиерита.

Исследование термических эффектов, происходящих при нагреве исходной массы состава № 2 производилось с помощью ДТА. Наличие первого слабо выраженного эндозффекта с максимумом в температурном интервале 60–70 °С обусловлено удалением небольшого количества сорбированной глинистыми минералами физической влаги. Второй интенсивный эндотермический эффект с максимумом при 520 °С связан с выделением химически связанной воды из глинистых минералов с формированием метакаолинита и других безводных силикатов. Экзотермический эффект с пиком при 970 °С характеризуется перестройкой решетки метакаолинита с переходом аморфизированной в скрытокристаллическую структуру и возможными полиморфными превращениями, а также первичным процессом формирования феррокордиерита.

Исследование образцов керамических материалов составов масс № 2, синтезированных в температурном интервале 1100–1200 °С, методом рентгенофазового анализа показывает тесную взаимосвязь между свойствами керамики и ее фазовым составом.

Фазовый состав исследуемых материалов полиминерален и представлен кварцем ( $SiO_2$ ), фаялитом ( $2FeO \cdot SiO_2$ ), муллитом ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) и феррокордиеритом  $2FeO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$  с преимущественным преобладанием карцсодержащей составляющей. Образование такой фазы как фаялит может быть объяснено возможным взаимодействием не вступившего в реакцию вюститита с образовавшимся кремнеземом при разложении глинистой составляющей.

У образца № 2, обожженного при температуре 1100 °С, идентифицируются все перечисленные кристаллические фазы, однако при дальнейшем увеличении температуры обжига до 1200 °С содержание фазы феррокордиерита возрастает более интенсивно, что будет сказываться на снижении ТКЛР синтезированных образцов.

Дополнительными фазами при этом являются фаялит, муллит и остаточный кристаллический кварц. С увеличением температуры спекания относительное количество кристаллической фазы кварца уменьшается, т.к. он частично растворяется в расплаве, а частично идет на формирование других фаз. В процессе увеличения температуры синтеза количество образовавшегося муллита незначительно увеличивается, а кристаллической фазы фаялита становится немного меньше.

**Заключение.** Установлено, что на основе системы  $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  получены механически прочные термостойкие материалы с пониженной температурой их обжига. Наилучшими физико-химическими свойствами обладает материал состава № 2, синтезированный при 1200 °С: водопоглощение – 3,52 %; кажущаяся плотность – 2470 кг/м<sup>3</sup>; ТКЛР –  $3,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ; механическая прочность при изгибе – 50,3 МПа; кислотостойкость – 97,55 %, щелочестойкость – 98,71 %; твердость по шкале Мооса – 7; термостойкость

(800 °С–вода) – 90 теплосмен; коэффициент теплопроводности – 0,79 Вт/(м·К). Фазовый состав материала представлен железистым кордиеритом, муллитом, фаялитом и кварцем.

#### Литература

1. Зобина, Л. Д. Оценка термостойкости новых материалов на основе кордиерита / Л.Д. Зобина, Т.Д. Семченко, Г.А. Гогаци // Огнеупоры, 1986. – № 4. – С. 10–12.
2. Масленникова, Г.Н. Керамические материалы: учеб. для студентов вузов / Г.Н. Масленникова, Р.А. Мамаладзе, С.О. Мидзута. – М.: Стройиздат, 1991. – 320 с.
3. Абдрахимова, Е.С. Формирование структуры изделий при обжиге глинистых материалов/ Е.С. Абдрахимова, Д.В. Абдрахимов, В.З. // *Материаловедение*. – 2005. – № 1. – С.31–36.
4. Абдрахимова, Е.С., Долгий В.П., Абдрахимов В.З. Структурные превращения соединений железа в легкоплавкой глине при различных температурах обжига / Е.С. Абдрахимова, В.П. Долгий, В.З. Абдрахимов // *Материаловедение*. – 2005. – № 2. – С. 39–42.

УДК 666.3/7

### ПОЛУЧЕНИЕ ВОЛЛАСТОНИТСОДЕРЖАЩИХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО И СИНТЕТИЧЕСКОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Дятлова Е.М.<sup>1</sup>, Сергиевич О.А.<sup>1</sup>, Шамкалович В.И.<sup>2</sup>, Хотилковская О.А.<sup>1</sup>

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

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

**Введение.** Проблема обеспечения машиностроительной и других отраслей промышленности, в производстве которых применяется литье металла в кокиль с использованием в качестве литейной чаши и прибыльной части керамического огнеупорного материала, отечественными огнеприпасами и освоение перспективных технологий их получения весьма актуальна. Огнеупорные припасы в основном закупают по импорту из России и Италии, поэтому разработка и организация производства аналогичных огнеупорных материалов в Республике Беларусь позволит решить вопросы снижения стоимости и импорто-замещения.

Кокиль представляет собой форму многократного использования (до 10 000 заливок) и идеально подходит для организации серийного и крупносерийного производства [1]. Наиболее перспективными керамическими огнеупорными материалами для литья алюминия и его сплавов являются огнеприпасы на основе силикатов, а именно силиката кальция – волластонита, который имеет ряд преимуществ: химически инертен к расплаву алюминия и его сплавов, имеет малую плотность, высокую пористость, низкий коэффициент теплопроводности – не более 0,3–

0,5 Вт/(м·К), количество отливок – более 1000, высокую термо- и шлакоустойчивость [2]. Диаграмма состояния системы  $\text{CaO-SiO}_2$  построена по данным Г. Ранкина и Ф. Райта, но с некоторыми уточнениями и дополнениями относительно соединения  $3\text{CaO-SiO}_2$  и области ликвации, имеет исключительное значение для техники, в частности для технологии цементов, шлаков черной металлургии, некоторых видов керамики [3]. Таким образом, целью работы является синтез и исследование технической керамики на основе волластонита для литья алюминиевых сплавов, что позволит в некоторой степени решить проблему импортозамещения на предприятиях машиностроительной отрасли Республики Беларусь.

**Методология.** Исходная смесь подвергалась совместному помолу в микрошаровой мельнице до остатка на сите № 0063 не более 2 %, далее масса увлажнялась водой до влажности 7–8 % и вылеживалась в течение 1–2 суток. Опытные образцы в виде дисков диаметром 23 мм и высотой 8–9 мм прессовались на гидравлическом прессе марки ПСУ–50 при давлении 20–25 МПа (прессование двухступенчатое, далее сушили при