

Анисина И. Н.

Оренбургский государственный университет
E-mail: anisina-inga@yandex.ru

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ МОНТМОРИЛЛОНИТ СОДЕРЖАЩЕЙ ГЛИНЫ

Одной из задач современного материаловедения является создание эффективных ресурсо- и энергосберегающих технологий производства керамических материалов с заданными свойствами. Перспективна разработка новых технологий и, в первую очередь, оптимизация процессов термообработки и дисперсных составов керамических масс с целью получения требуемых свойств, с использованием природного дешевого и доступного сырья. В связи с этим все большее внимание в области новых материалов уделяется глинам и системам на их основе. Методами химического, дисперсного, рентгенофазового, рентгенофлуоресцентного анализов, оптической микроскопии определены дисперсный и фазовый составы исходных керамических масс и образцов композиционного керамического материала на основе природной монтмориллонит содержащей глины одного из месторождений Оренбургской области. Глина относится к группе легкоплавкого глинистого сырья, с преобладанием двух фракций при средних эффективных диаметрах частиц 400 и 130 мкм. Для мелкодисперсной фракции интервал спекания вырождается в точку – 950 °С; армирование частицами SiC расширяет его от 950 до 1000 °С и повышает прочность композиционного керамического материала с 5 до 50 МПа после спекания при 1000 °С (2 ч.) с промежуточной выдержкой при 700 °С (1 ч.). Для частиц MC глины 400 мкм армирование керамической массы частицами SiC повышает коэффициенты тепло- и температуропроводности на 30%, в результате чего прочность на сжатие 50 МПа обеспечивается структурой, формирующейся после обжига при 950 °С (2 ч.) с промежуточной выдержкой при 700 °С (1 ч.). Кислотность воды затворения позволила исключить образование трещин в объеме образца, снизила скорости фазовых превращений при спекании. Максимальная прочность композиционного керамического материала состава монтмориллонит содержащей глины обусловлена содержанием силлиманита, количество которого определяется дисперсностью глинистых частиц и режимами синтеза.

Ключевые слова: кремнеземистая керамика, монтмориллонит содержащая глина, синтез, дисперсность, фракция, карбид кремния.

В последние 50 лет востребован материал с высокой термостойкостью, химической стойкостью, постоянными электрофизическими и высокими теплоизоляционными свойствами. В связи с этим все большее внимание в области новых материалов уделяется глинам и системам на их основе, поскольку минеральное сырье, обладая высоким потенциалом в отношении теплофизических и механических свойств, является доступным и имеет низкую себестоимость. Кремнеземистая керамика может эксплуатироваться в качестве функциональной керамики в виде втулок, вкладышей, подложек в нагревательных устройствах, печах в широком интервале температур, вплоть до 700 °С [1], [2]. Малая теплопроводность при низкой пористости и минимальной герметизации поверхности путем самоглазурования позволяет использовать ее в качестве отражателей для теплоизлучателей. Температура поверхности отражателя повышается мгновенно и практически без потерь идет на нагревание нижних слоев изделия, что исключает необходимость его охлаждения. Особое значение имеет высокая химическая стойкость, которая позволяет использовать кремнеземистую керамику в качестве установочной в химико-технологических процессах, химических шкафах.

Одной из главных причин, которая препятствует более широкому применению кремнеземистой керамики, является её хрупкость. Кремнеземистые керамические материалы обычно не испытывают пластической деформации и имеют низкую стойкость к ударным нагрузкам. Задача повышения прочности может быть решена путем армирования керамики тугоплавкими частицами карбида кремния. В технологии получения кремниевых пластин, используемых для нанесения эпитаксиальных слоев в производстве микроэлектронных компонентов, а также заготовок элементов солнечных батарей одной из основных операций является резка кристаллов кремния большого диаметра. При этом количество кремния, превращающегося в тонкодисперсный порошок, смешанный с абразивным материалом, как правило, с карбидом кремния, составляет до 50–60% от исходного. Вовлечение в технологию керамики техногенных отходов, образующихся в этих производствах, обуславливает выбор данного армирующего компонента.

Оренбургская область располагает большим разнообразием глинистых материалов, отличающихся по внешнему виду и окраске, химическому и минеральному составу, связующей

способности, содержанию загрязняющих примесей, огнеупорности, и т. п. Почти повсеместно в области распространены полиминеральные легкоплавкие глины, являющиеся основным сырьем для производства керамических строительных материалов. Однако возможность их использования в производстве функциональной (технической) керамики не установлена. Создание оптимальной структуры в керамике на основе малоизвестного специфического сырья невозможно без специальных исследований. Необходимо изучить эволюцию структуры на различных уровнях и основные характеристики кремнеземистой керамики на основе местной глины в зависимости дисперсных составов, ионного состава воды затворения керамической массы (шихты), количества армирующих добавок, а также оптимизации режимов термообработки.

Целью работы является комплексное исследование условий формирования структуры и получение прочного композиционного керамического материала функционального назначения на основе монтмориллонит содержащей глины.

Материал и методы исследования

В качестве объекта для исследования выбрана глина из Южно-Оренбургского месторождения, расположенного в 12 километрах к юго-востоку от г. Оренбурга. Глина данного месторождения используется для производства строительных материалов, в частности, керамзита. Элементный состав исходных компонентов определен с помощью метода химического анализа [3]. Дисперсный состав глины изучен методами гранулометрии, седиментационного анализа и количественной оптической микроскопии [4]. Для определения фазовых составов исходных керамических масс и образцов композиционного керамического материала, а также фазовых превращений, протекающих в них при спекании, использовался метод рентгенофазового анализа [3], [5]. Рентгенофазовый анализ проводили с помощью аппарата ДРОН-3, использовали медное излучение. Расшифровку дифрактограмм проводили по стандартным методикам, интенсивность пиков оценивали по центру тяжести дифракционных линий. Для описания и выявления закономерностей в формировании структуры керамического материала использовали методы оптической микроскопии в сочетании со статистическими измерениями. Кинетику спекания оценивали по технологическим параметрам (объемной усадке, из-

менению массы, плотности, пористости), определяемым по стандартным методикам.

В исследовании влияния теплофизических процессов на свойства гетерогенных систем применяли экспериментальные и расчетные методы, имеющие своей целью прогнозирование свойств и поведения материала при воздействии температуры. Такие характеристики теплофизических свойств, как удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности могут использоваться для описания изменений, которые происходят в структуре при спекании керамических материалов, так как они зависят от температуры и их можно считать структурно чувствительными. В работе использован стационарный калориметрический метод определения коэффициентов теплоемкости и теплопроводности керамической массы и керамических образцов. Определяли прочность на сжатие.

Керамические образцы для исследования получали по традиционной технологии: готовили керамическую шихту, добавляя в глину до 20% воды. Полученную массу перемешивали и помещали на сутки в эксикатор для равномерного распределения влаги по объему. С помощью пресса-твердомера ТШ-ВМ производили полусухое прессование образцов в форме дисков диаметром 25 и высотой 10 мм. Сушили образцы сутки на воздухе при комнатной температуре и 2 часа при 160 °С. Обжигали образцы в электрической муфельной печи резистивного нагрева типа СНОЛ со скоростью нагрева 6 К/мин. Охлаждали образцы вместе с печью.

Результаты и их обсуждение

Одним из направлений, позволяющим улучшить качество глинистых материалов, повысить эффективность технологического процесса, является «обогащение» природного сырья. Самыми распространенными приемами обогащения глин являются: рассев на фракции, магнитная сепарация, промывка (удаление водорастворимых солей и оксидов калия и натрия) и подбор для затворения шихты воды с оптимальными значениями pH .

Гранулометрический анализ показал, что исследуемая монтмориллонит содержащая глина относится к группе легкоплавкого глинистого сырья, с преобладанием двух фракций – А (630–160 мкм) и В (160–40 мкм), средние эффективные диаметры частиц в которых составляют соответственно: 400 и 130 мкм (3:1). Важнейшей характеристикой качества глины, ис-

пользуемой для производства керамики, является содержание железистых примесей. Повышенное содержание железистых примесей увеличивает склонность глины к вспучиванию в процессе обжига. Чтобы снизить количество железа в глине, используют метод магнитной сепарации для удаления частиц, обладающих ферро- и ферримагнитными свойствами [6]. В исследуемой глине, согласно результатам химического анализа, высокое содержание железа (около 9,5%), однако магнитная сепарация оказалась неэффективной ввиду малого количества магнитных соединений железа.

Существенное влияние на фазовые превращения и их интенсивность могут оказывать водорастворимые соли калия и натрия, образующие легкоплавкие эвтектики. Водорастворимые соли активирует процесс спекания, способствуя быстрому образованию легкоплавкой стеклофазы, содержащей в твердом растворе оксиды натрия и калия. При охлаждении быстрая кристаллизация легкоплавких стекол приводит к дополнительному охрупчиванию керамических образцов и снижению прочности на сжатие и термостойкости. Таким образом, при подготовке шихты целесообразно удаление водорастворимых солей из монтмориллонит содержащей глины.

В керамической технологии наиболее распространены шихты, в которых жидкой фазой является вода. В каждом случае при затворении глины водой образуются индивидуальные структурные комплексы или кластеры, физико-химические и технологические свойства которых определяются структурой, размерами и формой глиняных частиц, толщинами водных оболочек и составом адсорбированных катионов. Диапазон вариации внутренних параметров керамической массы, связанных с pH воды затворения, особенно широк для монтмориллонитовых глин. Керамическая масса из глины с кислой водой имеет высокую эластичность, с кислой водой частицы монтмориллонит содержащей глины взаимодействуют наиболее интенсивно, о чем свидетельствуют максимальные значения удельной теплоемкости. Структура формируется с высокой внутренней энергией, большой теплоудерживающей способностью, следовательно процессы синтеза керамики должны активироваться.

На первом этапе изучали эволюцию структуры и свойств полидисперсных образцов, подвергнутых предварительным обжигам

($T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, со скоростью нагрева $v = 6\text{ K/мин}$ с вариацией времени выдержки от 1 до 4 часов), при которых практически не включен механизм жидкофазного спекания. Интенсивность спекания оценивали по повышению плотности и снижению открытой пористости. Результаты экспериментов приведены на рисунке 1. Процесс спекания можно разбить на 3 стадии: на 1-й стадии (2-й час) скорость уплотнения максимальная – 15%/час, открытая пористость снижается со скоростью 9%/час. На второй стадии (3-й час) плотность и пористость практически не изменяются, формируется структура с пористостью около 13%. На третьей стадии (4-й час) плотность растет на 5%, пористость снижается на 2%, очевидно, за счет начала образования жидкофазных прослоек, заполняющих поры. Поэтому в дальнейшем для предварительных обжигов выбрано время выдержки от 1 до 3 часов.

После обжига при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 часа фазовый состав представлен β -кварцем (30%), α -корундом (10%), железистым кордиеритом (20%), гематитом (10%), шпинель (30%). При $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ фазовые превращения, в результате которых должны образоваться прочные алюмосиликаты, практически не развиваются.

Для кремнеземистой керамики типичным способом синтеза является спекание в присутствии жидкой фазы, поэтому наибольший интерес представляет исследование вариации внутренних (мезо- и микроструктуры керамической массы) и внешних параметров на формирование структуры в образцах.

В качестве внешних управляющих параметров выбраны следующие режимы обжигов:

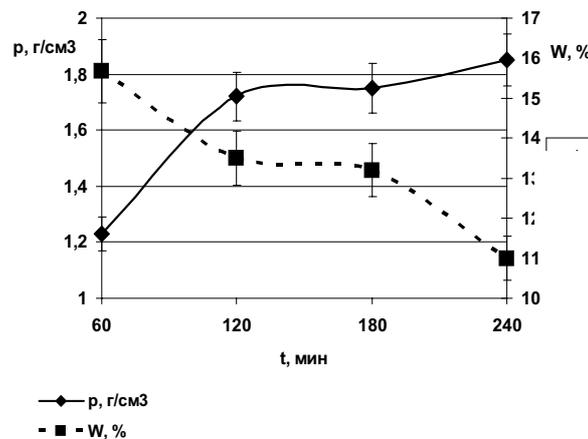


Рисунок 1. Зависимость плотности и открытой пористости образцов от времени выдержки при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$

1. 950 °С (3 ч.) (определение кинетики жидкостного спекания);

2. 1000 °С (3 ч.) (определение кинетики жидкостного спекания).

В качестве внутренних управляющих параметров использовали:

1. Дисперсность частиц, мкм: А (630–160) и В (160–40);

2. Кислотность воды затворения, pH : 2 и 7.

Влияние дисперсности и pH воды затворения на процессы спекания изучали после обжига при 950 °С (3 ч.). Усадка образцов при использовании $pH7$ выше; кислотность воды затворения $pH2$ снижает скорость спекания в 1,6 и 1,1 для А и В соответственно, что согласуется со значениями теплоемкости: с $pH2$ она выше в 1,2 для А и в 1,1 для В (рисунок 2).

При температуре обжига 900 °С в образцах с $pH7$ формируется структура с трещинами независимо от дисперсности. После обжигов при 950 °С (3 ч.) образуются градиентные структуры. В объеме образцов наблюдаются границы резких фазовых переходов между поверхностными слоями кирпичного цвета и внутренними областями черно-серого цвета, результата восстановительных реакций оксидов железа. При $pH2$ эти области меньше.

Поскольку повышение температуры до 950 °С не устраняет неоднородностей в мезоструктуре, опробовали обжиг при 1000 °С (3 ч.). Образцы сильно деформированы в результате пережога. Реакции восстановления железа идут в объеме, занимающем более 80%, и являются доминирующими фазовыми превращениями.

Рассмотренные режимы спекания не реализуют условий получения однородной струк-

туры по объему образцов. Для исследуемой глины чрезвычайно узкий интервал спекания практически вырождается в точку неустойчивого равновесия (при 950 °С), для которой зафиксированы максимальные значения плотности образцов (до 1,97 г/см³). Прочность на сжатие при хрупком разрушении образцов около 10 МПа не зависит от ионного состава воды затворения и размеров частиц. Для расширения интервала спекания и получения однородной структуры необходимо понизить скорость фазовых превращений при обжигах. Для этого можно изменить внутренние или внешние управляющие параметры: а) ввести промежуточные выдержки при температурах ниже температуры образования жидкой фазы; б) использовать специальные наполнители для повышения тепло- и теплопроводности керамической массы при высоких температурах; в) повысить кислотность воды затворения.

Исследовали влияние армирования частицами карбида кремния (размерами менее 20 мкм) на кинетику спекания образцов ККМ. Частицы SiC использованы также в качестве активаторов спекания – известно, что при 1000 °С в метастабильных модификациях карбида кремния проходят полиморфные превращения с экзотермическим эффектом. Кроме того, теплопроводность SiC в десятки раз выше, чем у глинистых минералов, что должно способствовать образованию однородной структуры в объеме образцов за счет большей скорости прогрева. По формуле Оделевского для двухкомпонентных структур со сферическими включениями (SiC) провели расчет эффективной теплопроводности твердофазного каркаса:

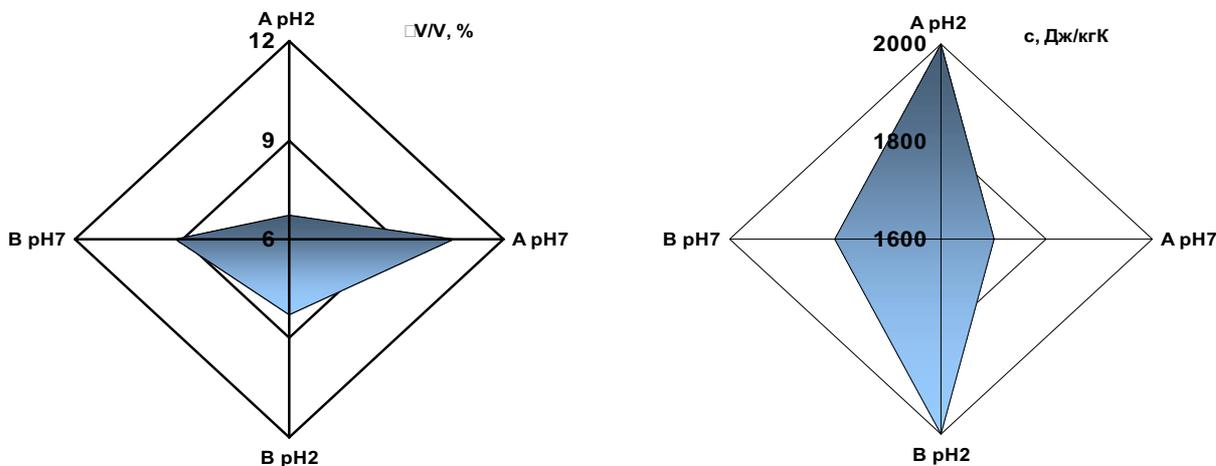


Рисунок 2. Значения усадки и удельной теплоемкости для образцов А и В, затворенных водой с кислотностью pH2 и pH7

$$k_{эф} = k_m f, \quad f = 1 - \frac{m_2}{\frac{1}{1 - k_2/k_m} - 1 - m_2},$$

где $k_{эф}$, k_m , k_2 – теплопроводность эффективная, матрицы (глины) и дисперсной фазы; m_2 – объемная концентрация дисперсной фазы ($m_2 = 0,8$ и $0,7$ для 10% и 20% масс. частиц SiC). Согласно результатам расчетов, коэффициент теплопроводности для образцов с содержанием 20% частиц SiC должен увеличиться в 5–7 раз по сравнению с теплопроводностью образцов без частиц карбида кремния. Результаты расчетов коэффициентов теплопроводности обычно не коррелируют с результатами экспериментальных измерений k , поскольку в этих моделях не заложены структурные параметры, в частности, дисперсность спекаемой массы. Кроме того, в процессе нагрева и при высокотемпературной выдержке в керамических образцах идут многочисленные химические реакции и фазовые превращения, существенно влияющие на процессы переноса тепла.

Для образцов ККМ (монтмориллонит содержащая глина – частицы SiC) экспериментально определены коэффициенты теплопроводности после сушки и спекания (рисунок 3).

После сушки значения теплопроводности изменяются с увеличением содержания SiC в 1,4 раза для обеих фракций: от 0,8 до 1,1 Вт/м·К (В) и от 0,9 до 1,3 Вт/м·К (А). После спекания образцов в режиме 700 (1 ч.) – 950 °С (2 ч.) эффект влияния частиц SiC не меняется: значения коэффициентов теплопроводности линейно растут –

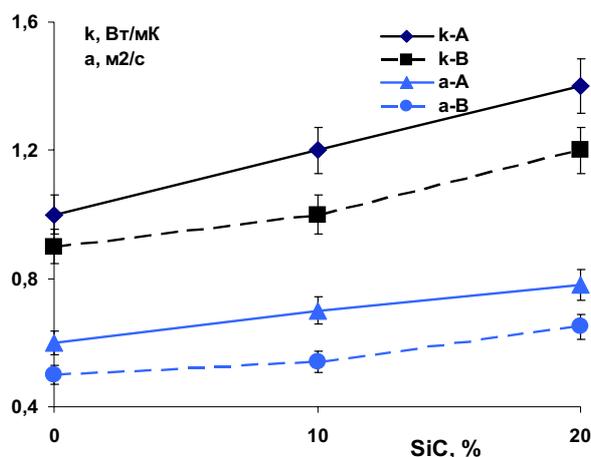


Рисунок 3. Значения коэффициентов тепло- и температуропроводности для образцов ККМ после сушки и спекания

от 0,9 до 1,25 Вт/м·К (В) и от 1 до 1,4 Вт/м·К (А).

Для кинетики фазовых превращений при высоких температурах определяющее значение имеет коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость распространения температуры в теле. Температуропроводность для образцов из фракции А во всех случаях в 1,2 раза выше чем для фракции В. Максимальное значение температуропроводности наблюдается при 20 %-м содержании SiC в этой фракции.

Для определения режима спекания, в котором наиболее эффективно влияние армирующих частиц (0, 10, 20%) на структуру и прочность ККМ, проводили обжиги по режимам для соответствующих составов керамических масс: 700 °С (1 ч.) – 950 °С (2 ч.) для *ApH7*, *BpH7*, *ApH2*; 700 °С, 1 ч. – 1000 °С (2 ч.) для *BpH2*. Кинетику спекания образцов оценивали по макропараметрам. Максимальная усадка наблюдается для образцов без армирующих добавок и колеблется в широких пределах – от 8 до 14% (рисунок 4). Использование воды с кислотностью *pH2* уменьшают усадку, снижая скорость спекания. Для образцов, содержащих 10% частиц SiC, усадка практически не отличается от усадки образцов без добавок. Введение 20% частиц SiC снижает в 1,7 раз усадку крупнозернистых образцов, затворенных с *pH2*. Усадка образцов ККМ состава В-20 уменьшается на 25% независимо от *pH* воды затворения. Повышение температуры спекания до 1000 °С не приводит к резкому увеличению усадки образцов В-20.

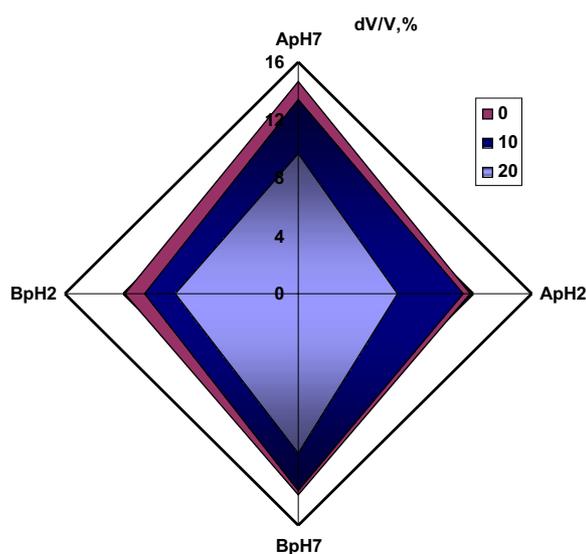


Рисунок 4. Усадка образцов ККМ фракций А и В

Значения плотности образцов с 10 и 20% SiC для случая обжига в режиме 700 °С (1 ч.) – 950 °С (2 ч.) одинаковы, то есть активность спекания с увеличением содержания карбидных частиц снижается (рисунок 5). Плотность увеличивается для *ВрН2*. Температура 1000 °С обеспечивает стабильную скорость спекания образцов с увеличением массы частиц SiC. Открытая пористость *W* существенно ниже для мелкозернистых образцов (рисунок 6); для образцов фракции А 6–9%, а образцы фракции В имеют значение *W* ~ 2–6%. ККМ с максимальной плотностью 2,3 г/см³ и минимальной открытой пористостью 2% получается из керамической массы, представляющей собой дисперсную систему, включающую частицы МС глины фракции В (160–40 мкм), 20% (масс) УДП – частиц SiC,

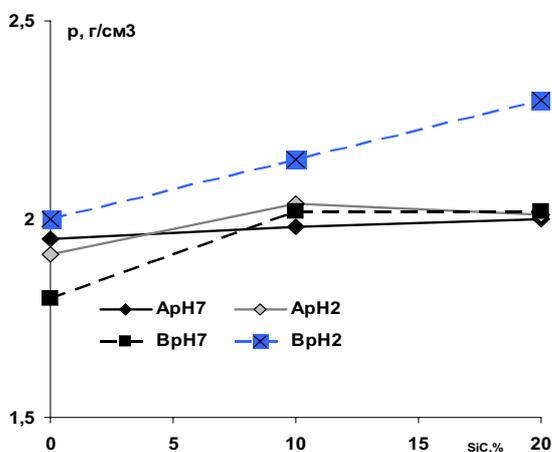


Рисунок 5. Плотность образцов ККМ фракций А и В

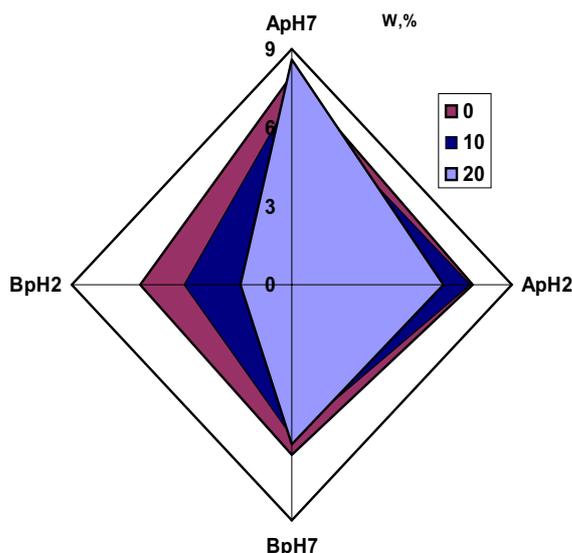


Рисунок 6. Открытая пористость в образцах ККМ фракций А и В

воду затворения с кислотностью *pH* 2, путем обжига в режиме 700 °С (1 ч.) – 1000 °С (2 ч.) при скорости нагрева 6 К/мин.

Эволюцию структуры ККМ на основе монтмориллонит содержащей глины и, связанные с ней свойства, исследовали фазовым анализом. Изменения в фазовых составах определяли для образцов ККМ фракции А в двух «крайних» точках: 1* (А, *pH* 2, 950 °С (3 ч.) и 2* (А-20, *pH* 2, 700 °С, 1 ч. – 950 °С (2 ч.)). Данные РФА свидетельствуют о том, что при примерно равном количестве кристаллических фаз их содержание различается. Так в точке 1* наблюдаются в свободном состоянии оксиды алюминия и кварца: бёмит $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и α -кварц SiO_2 , составляющие около 50% всех кристаллических фаз. Остальные кристаллические фазы представлены гематитом, шпинелью и небольшим количеством силлиманита. При оптимизации режима обжига и добавка 20% частиц SiC наряду с фазой $\beta\text{-SiC}$ (20%) вместо оксидов алюминия и кремния, шпинели наблюдаются в большом количестве алюмосиликаты – силлиманит (40%) и микроклин. Увеличивается доля гематита.

Анализ фазовых составов образцов ККМ фракции В проводили для трех точек:

- В, *pH* 2, 950 °С (3 ч.),
- В-20, *pH* 2, 700 °С (1 ч.) – 950 °С (2 ч.),
- В-20, *pH* 2, 700 °С (1 ч.) – 1000 °С (2 ч.).

В образцах без добавок основной фазой является бёмит $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (более 50%), остальные фазы представлены гематитом и свободным кварцем и в равных долях силлиманитом и микроклином. В образцах, обожженных при 1000 °С, меньше всего кристаллических компонентов. Большая доля стеклофазы. Повышение температуры обжига до 1000 °С приводит к доминированию силлиманита (более 50%), частичному сохранению свободного α -кварца (10%), фазы

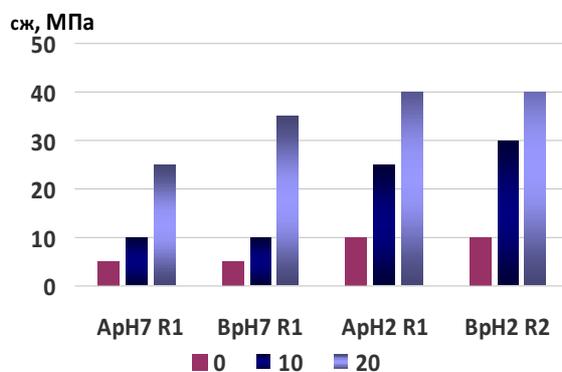


Рисунок 7. Прочность на сжатие образцов ККМ

β -SiC (20%), гематита (10%), исчезновению оксидов алюминия. Такая эволюция фазового состава, и в первую очередь появление доминирующей фазы силлиманита, должна сопровождаться повышением механической прочности.

Определяли прочность на сжатие образцов ККМ. При режиме 700 °С (1 ч.) – 950 °С (2 ч.) для ККМ (А-20 при $pH2$) значения $\sigma_{сжс} \approx 1,5 \sigma_{сжс}$ (А-20 при $pH7$) (рисунок 7). Такое различие в эффектах упрочнения связано с наличием трещин длиной около 50 мкм, в образцах А-20 при $pH7$.

С увеличением содержания SiC для образцов фракции А скорость распространения трещин снижается. Трещина сталкиваясь с карбидной частицей, меняет направление движения, теряя при этом скорость и часть энергии и в образцах А-20 является минимальной (меньше 100 мкм/с). В режиме 700 °С, 1 ч. – 1000 °С (2 ч.) наблюдается аддитивный энергетический эффект: экзотермические полиморфные превращения в SiC, в результате чего исчезают термостабильные многослойные полиморфы SiC; фазовые превращения монтмориллонит > силлиманит с экзотермическим эффектом. Максимальная прочность 40–50 МПа достигается для ККМ состава В-20 SiC, затворенного на воде с $pH2$, при минимальной скорости разрушения – 100 мкм/с. За один акт перемещения трещина проходит расстояние, соизмеримое с размером зерна.

Выводы

Таким образом, комбинация вариации внутренних параметров керамической массы и режимов обжига позволяет расширить интервал спекания исследуемой глины на 50° (950–1000 °С). Армирование частицами SiC предотвращает процесс пережога глины, способствуя образованию однородной структуры по сечению образцов, замедляя теплофизические процессы, характерные для монтмориллонит содержащих глин: плавление, образование стеклофазы и кипение легкоплавких фаз. Максимальная прочность (40–50 МПа) ККМ (глина – 20% SiC – вода затворения $pH2$) достигается двумя путями:

1) спеканием крупнодисперсной керамической массы при 950 °С в течение двух часов с промежуточной часовой выдержкой при 700 °С, со скоростью нагрева 6 К/мин;

2) спеканием мелкодисперсной керамической массы при 1000 °С в течение двух часов с промежуточной часовой выдержкой при 700 °С, со скоростью нагрева 6 К/мин.

Практическое использование полученных результатов позволит создавать керамический материал функционального назначения, улучшит его прочностные характеристики. Использование техногенного сырья снизит себестоимость и упростит технологию получения изделий.

12.11.2014

Список литературы:

1. Пивинский, Ю.Е. Кварцевая керамика / О.Е. Пивинский, А.Г. Ромашин. – М: Металлургия, 1974. – 264 с.
2. Каныгина, О.Н. Физические аспекты термостойкости оксидной керамики / О.Н. Каныгина. – Бишкек: КРСУ, 2003. – 192 с.
3. Монтмориллонит содержащая глина как сырье для функциональных материалов / О.Н. Каныгина [и др.] // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2013. – №10, октябрь. – С. 315–318.
4. Анисина, И.Н. Фазовые превращения в бентонитовой глине Оренбуржья при высоких температурах / И.Н. Анисина // Материаловедение. – 2011. – №10. – С. 51–54.
5. Дисперсионный анализ монтмориллонитосодержащей глины Оренбуржья / Каныгина О.Н. [и др.] // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – №12, декабрь. – С. 393–395.
6. Иванова, А.В. Технологические испытания глин: учеб. электр. текстовое издание / А.В. Иванова, Н.А. Михайлова. – ГОУ ВПО УГТУ УПИ, 2005. – 41 с.
7. Evtushenko, E.I. Structural in stability of clay raw materials / E.I. Evtushenko [и др.] // Glass and Ceramics, 2004. – №5.

Сведения об авторах:

Анисина Инга Николаевна, старший преподаватель кафедры общей физики
Оренбургского государственного университета

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 1302а, тел. (3532) 372439, e-mail: anisina-inga@yandex.ru