

March 2018

HEAT RESISTANT CERAMICS ON THE BASIS OF ALUMINIUM TITANATE, MULLITE, SPINEL SYNTHESIZED BY SOLAR ENERGY

Dilbara Juraevna GULAMOVA

Materials Science Institute, SPA «Physics-Sun», Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, gulamova@uzsci.net

Jakhongir Shermatovich TURDIEV

Materials Science Institute, SPA «Physics-Sun», Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, kadan79@mail.ru

Hayot Nurovich BAXRONOV

Materials Science Institute, SPA «Physics-Sun», Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, baxronov@mail.ru

Andrey Anatol'yevich NEBESNIY

Materials Science Institute, SPA «Physics-Sun», Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, nebesny-andrey@yandex.ru

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/cce>

Recommended Citation

GULAMOVA, Dilbara Juraevna; TURDIEV, Jakhongir Shermatovich; BAXRONOV, Hayot Nurovich; and NEBESNIY, Andrey Anatol'yevich (2018) "HEAT RESISTANT CERAMICS ON THE BASIS OF ALUMINIUM TITANATE, MULLITE, SPINEL SYNTHESIZED BY SOLAR ENERGY," *CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING*: Vol. 2018 : No. 1 , Article 1.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/cce/vol2018/iss1/1>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.

HEAT RESISTANT CERAMICS ON THE BASIS OF ALUMINIUM TITANATE, MULLITE, SPINEL SYNTHESIZED BY SOLAR ENERGY

Dilbara Juraevna GULAMOVA (gulamova@uzsci.net), Jakhongir Shermatovich TURDIEV (kadan79@mail.ru), Hayot Nurovich BAXRONOV (baxronov@mail.ru), Andrey Anatol'yevich NEBESNIY (nebesny-andrey@yandex.ru), Sirojiddin Khurramovich BOBOKULOV (siroj-1705@mail.ru)
Materials Science Institute, SPA «Physics-Sun», Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Stable aluminium titanate, mullite, shpinele, perspective for use on the glasses production processing are obtained by solar energy. By the technology of moulding and moist pressing heat-resistan, thermostabe, chemically inert ceramic are developed. Thermomechanical properties and chemical stability of ceramics spinnered are investigated.

Keywords: thermal stability, ceramics, solar energy, aluminium titanate, spinel, mullite, aluminium, spinneret.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРМОСТОЙКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ТИТАНАТА АЛЮМИНИЯ, МУЛЛИТА, ШПИНЕЛИ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Дильбара Джуроевна ГУЛАМОВА (gulamova@uzsci.net), Жахонгир Шерматович ТУРДИЕВ (kadan79@mail.ru), Хаёт Нурувич БАХРОНОВ (baxronov@mail.ru), Андрей Анатольевич НЕБЕСНЫЙ (nebesny-andrey@yandex.ru), Сирожиддин Хуррамович БОБОКУЛОВ (siroj-1705@mail.ru)
Институт Материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Определены материалы, перспективные для использования в процессах переработки стекломассы. На основе методов шликерного литья и полусухого прессования разработаны технологии получения термостойких химически инертных керамических фильтров на основе титаната алюминия, синтезированных солнечной энергией. Исследованы термомеханические свойства и химическая устойчивость фильтровых керамик.

Ключевые слова: термостойкость, керамика, солнечная энергия, шпинель, муллит, титанат алюминия, фильтра.

QUYOSH ENERGIYASIDA SINTEZ QILINGAN TITANAT ALYUMINIYA, MULLIT, SHPINEL ASOSIDA ISSIQLIKKA CHIDAMLI KERAMIK MAXSULOTLAR OLIH TEXNOLOGIYASI

Dilbara Juraevna GULAMOVA (gulamova@uzsci.net), Jahongir Shermatovich TURDIEV (kadan79@mail.ru), Hayot Nurovich BAXRONOV (baxronov@mail.ru), Andrey Anatolevich NEBESNIY (nebesny-andrey@yandex.ru), Sirojiddin Khurramovich BOBOKULOV (siroj-1705@mail.ru)
O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi "Fizika-Quyosh" Ilmiy ishlab chiqarish birlashmasi, Materialshunoslik instituti, Toshkent, O'zbekistan

Shisha massasiga ishlov berish jarayonida ishlatish uchun istiqbolli materiallar aniqlandi. Quyosh energiyasida sintez qilingan titanat alyuminiy asosida issiqlikka bardoshli kimyoviy inert keramik filer olish texnologiyasi yarim quruq presslash va shlikerli quyish usullari asosidagi ishlanma tayyorlandi. Keramik filerlarning kimyoviy turg'unligi va termomehanik xossalari o'rganildi.

Kalit so'zlar: issiqlikka chidamlilik, keramika, quyosh energiyasi, shpinel, mullit, titanat aluminiy, filiera.

Введение

Перечень материалов, перспективных для использования в условиях термошока и химически агрессивной среды, очень ограничен. В частности, такими условиями эксплуатации характеризуются стекла и стеклянные изделия, металлы, процессы аффинажа спечметаллов. В производствах, связанных с обработкой стекло-массы, требования к изделиям по высокой термостойкости и механической прочности включают жесткие ограничения по химическому взаимодействию расплава стекол с керамической оснасткой. Одним из перспективных материалов для керамики в агрегатах для стекловарения определена алюмомагниева шпинель. Широко применяется для химически инертной футеровки стекловаренных печей керамика из муллита [1-3], карбида кремния, материалов на основе окси-карбидных систем из Al_2O_3-SiC (SiN) [4, 5]. Перспективны керамические изделия, удовлетворяющие требованиям высокой термостойкости в сочетании с повышенной механической прочностью и химической устойчивостью на основе титаната алюминия. Интерес к титанату алюминия, начиная с 30-х годов прошлого столетия, не ослабевает, т.к. это один из наиболее многообещающих материалов с комплексом указанных свойств и трудно найти ему альтернативную замену [6, 7].

Наиболее часто используемые технологии синтеза шпинели, муллита, титаната алюминия и других оксидных керамических материалов основаны на методе твердфазных реакций и осуществляются путем обжига в заданных температурно-временных условиях [7-11]. Возможным путем сокращения трудоемких процессов предварительного синтеза материала заданного состава и последующего изготовления из него изделия является совмещение синтеза и отжига отформованного изделия из сырьевого материала. Таким путем целесообразно изготовление керамических изделий однокомпонентного состава без требований к гомогенности состава и структуры, однако, при использовании многокомпонентной смеси трудно осуществить идентичные многократные твердфазные реакции, не нарушая форму изделия. Так как керамика, удовлетворяющая требованиям современного уровня промышленности, является многокомпонентной, то для получения качественных изделий необходим предварительный синтез материала требуемого состава с воспроизводимыми свойствами и последующая технология, обеспечивающая изготовление изделия с комплексом требуемых характеристик.

Промышленные технологические процессы получения керамических материалов сложно-

го состава долговременны и трудоемки, так как связаны с многократными промежуточными обжигами, помолами и прессованием реактивной смеси компонентов. Недостатками твердофазных технологий являются сложность получения воспроизводимого фазового состава, морфологии, зернового состава и, соответственно, свойств целевых материалов. Решением, устраняющим некоторые недостатки твердофазного метода синтеза, являются расплавные методы. При относительной простоте процесса синтеза в расплаве, основным недостатком расплавных методов, использующих электрический нагрев, индукционные токи, плазму, СВЧ-излучение, является сложное технологическое оборудование и высокая энергоемкость процессов синтеза. При жестких ограничениях ресурсного обеспечения производств источниками энергии становятся очевидны перспективы и преимущества применения возобновляемых источников энергии, особенно солнечной, для разработки технологий получения высокотемпературных керамических материалов сложного состава [11, 12]. Результаты использования концентрированной солнечной энергии для получения оксидных материалов высшей огнеупорности приведены в работах [12, 13, 14]. Технологии на основе использования нагрева солнечной энергией для совместного плавления компонентов позволяют получить гомогенный многокомпонентный материал заданного состава с контролируемым размером зерна, что соответствует основным требованиям, предъявляемым к керамическим материалам [15]. Комплекс высоких и воспроизводимых свойств материалов, синтезированных солнечной энергией, свидетельствует о целесообразности развития исследований, направленных на выявление возможности практического использования материалов, синтезированных с использованием солнечной энергии.

Объекты и методы исследования

В данной работе представлены результаты получения керамики из стабилизированного титаната алюминия, муллита, шпинели, синтезированных плавлением концентрированной солнечной энергией на Большой солнечной печи мощностью 1 мегаватт (Паркент, Узбекистан).

Для синтеза стабилизированного титаната алюминия, муллита, шпинели использованы технологии совместного плавления смесей исходных оксидов в соотношениях, соответствующих стехиометрическим составам, представленным в таблице 1 и последующая закалка расплава со скоростями охлаждения 103-104 град/сек. для регулирования зернового состава. При скорости охлаждения расплава сливом в холодную воду (103 град/сек.) получены сфероиды диаметром 1-6 мм. Резкая закалка расплава диспергированием осуществлена для получения ультрадисперсного зерна ≤ 20 мкм.

Фазовый состав синтезированных материалов определяли рентгенофазовым методом на дифрактометре ДРОН-УМ1, $\text{CuK}\alpha$ -излучение, Ni-фильтр с использованием данных картотеки ASTM. Кажущуюся плотность и пористость определяли традиционными методами. Прочность исследовали на керамических балочках размером 5x5x8мм., полученных спеканием при температуре 1500 °С, 2 часа в печи с нагревателями из хромита лантана. Зерновой состав синтезированных титаната алюминия, муллита, шпинели исследовали микроструктурным анализом [16].

Результаты и обсуждение

Исходное соотношение компонентов для получения материала на основе стабилизированного титаната алюминия отличалось от использованного в работе [17], где установлено, что количество MgO , необходимое для стабилизации титаната алюминия составляет 5 мас.%, а шпинель присутствует в виде следов. Поскольку шпинель характеризуется хорошими термомеханическими свойствами, для повышения механических свойств керамики за счет увеличения содержания шпинели, в исходный состав перед синтезом вводили избыточное, по отношению к необходимому для стабилизации титаната алюминия, количество MgO , равное 15 мас.% (таблица 1). Анализ фазового состава синтезированного материала по данным рентгенофазового анализа показал, что материал на основе титаната алюминия содержал две фазы. Основной фазой являлся титанат алюминия, дополнительной фазой была шпинель (рис. 1а). Стабилизация титаната алюминия осуществлялась не только за счет “выравнивания” связей Al-O в Al^{3+} -содержащих октаэдрах кристаллической решетки при замещении катионов Al^{3+} на Mg^{2+} , но оказывала влияние примесная фаза - шпинель. Расположение зерен шпинели на межзеренных границах титаната алюминия нивелировало концентрацию напряжений между зернами, приводящую к распаду титаната алюминия [18].

С целью создания композитной керамики, обладающей более высокими термомеханическими свойствами по сравнению с двухфазным материалом на основе титаната алюминия, был разработан состав из трех материалов: стабилизированного титаната алюминия, шпинели, муллита. Фазовый состав муллита и шпинели, синтезированных концентрированной солнечной энергией, представлен на дифрактограммах рис.1 и в таблице 1.

В литературе представлены данные о высоких термомеханических свойствах шпинельной и муллитовой керамики, синтезированных методом твердофазных реакций [8, 19]. В данной работе эти сведения были приняты во внимание, как ориентировочная информация, т.к. при использовании плавящихся материалов с плохо развитой активной поверхностью результаты могли быть иными по сравнению с синте-

Свойства керамических материалов, синтезированных солнечной энергией

Состав, масс %	Кажущаяся плотность, г/см ³	Пористость, %	Размер зерна, мкм	Параметры элементарной ячейки, нм.
Al _{1,52} Mg _{0,5} TiO ₅ + MgO15%	3.1-3.3	3,62	10-800	a=0,3590 b=0,9489 c=0,9672
Al ₆ Si ₂ O ₁₃	3,85	1,21	-	a=0,745 b=0,754 c=0,278
MgAl ₂ O ₄	3,55	2,05	660-24	a=0,784 b=0,784 c=0,784

зированными методом твердофазных реакций. Однако, результаты исследования показали, что термомеханические свойства и химическая устойчивость керамики из плавящихся концентрированной солнечной энергией материалов были лучше. Удовлетворительные результаты объяснялись влиянием положительных факторов, присущих синтезу под воздействием солнечного излучения, на свойства целевых материалов. Использование материалов на основе титаната алюминия с изначально сформированной анизотропной структурой позволило создать слоистую структуру, определяющую высокую термостойкость благодаря эффекту “скольжения” слоев, что крайне затруднительно или невозможно реализовать в твердофазных материалах с гранулярной структурой. Муллит и шпинель стехиометрического состава не содержали примесных фаз, которые могли оказать негативное влияние на термостойкость. Сконструированная их

трех материалов керамика обладала высокими термомеханическими свойствами благодаря влиянию индивидуальных свойств каждого материала, входящего в состав целевой керамики.

Возможность создания контролируемого размера зерна изменением скорости охлаждения расплава позволила получить зерно ультрадисперсного диапазона, что расширяло возможности регулирования прочности целевой керамики. Такие материалы требовали меньшего времени помола. Сокращение времени помола и получение зерна менее 40 мкм. определялись тем, что в результате сверхбыстрой закалки расплава происходила кристаллизация зерен с плоскими межзеренными границами и формировались ультрадисперсные кристаллы, не соединенные зонами диффузии, которые формируются при твердофазном синтезе [20]. Строение закаленных плавящихся материалов со слабыми межкристаллитными связями устраняло трудности помола материалов, полученных твердофазным спеканием или плавлением на блок в промышленных дуговых и индукционных печах. Зерновой состав плавящихся материалов после помола приведен в таблице 2.

Для изготовления керамических фильтров из материалов, полученных в солнечной печи, разработаны технологические процессы, основанные на методах шликерного литья и полусухого прессования. Разработка технологий изготовления керамики из плавящихся солнечной энергией материалов, а не использование известных твердофазных методов, была обусловлена тем, что свойства плавящихся материалов - высокая плотность, малая активная поверхность, низкая пористость - отличаются от свойств материалов аналогичного состава, но полученных традиционной технологией твердофазного спекания. Соответственно, устойчивость шликера, температурно-временные режимы спекания гелиоматериалов будут отличаться от условий, использованных для порошков, полученных из твердофазных материалов.

Процесс изготовления керамических фильтров методом шликерного литья из смеси стабилизированного титаната алюминия, шпинели, муллита включал операции, представленные на рис. 2.

Изготовлению фильтров методом полусухого прессования предшествовало изготовление керамических образцов-балочек. Исследование термомеханических свойств и устойчивости в расплавах стекол опытных керамических образцов позволило выявить оптимальный зерновой состав, режимы формования и термообработки фильтров. Исходную массу для прессования готовили из смеси порошков различных фракций в соотношениях: 100-120 мкм 25 мас.% + 60-80 мкм 40 мас.% + 10-40 мкм. 25 мас.% + ≤ 10-12

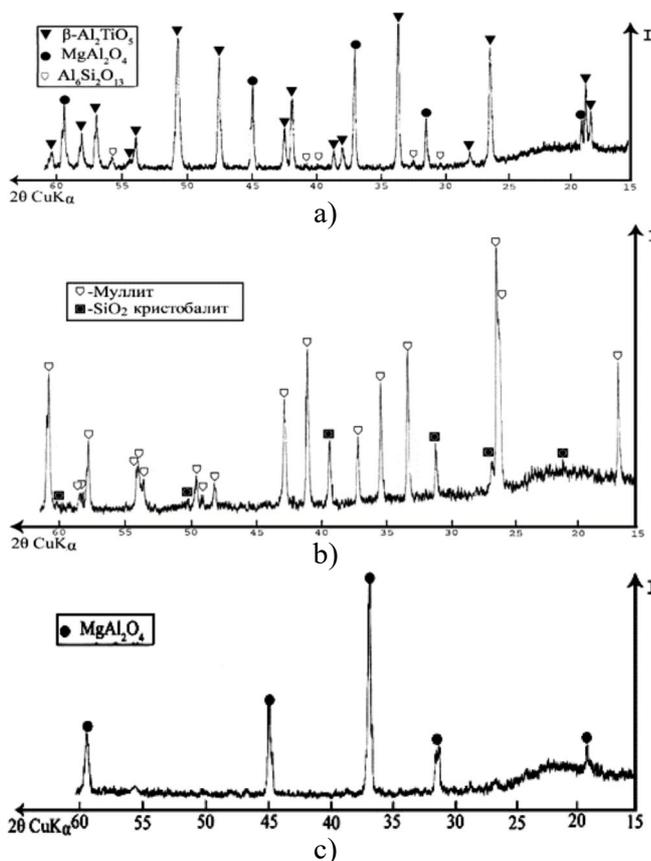


Рис. 1. Фазовый состав стабилизированного титаната алюминия (а), муллита (б), шпинели (с), синтезированных солнечной энергией.

Таблица 2

Зерновой состав титаната алюминия, шпинели, муллита, полученных закалкой расплава на солнечной печи

Состав материала	Содержание фракций (мкм), %								
	800-500	500-315	315-250	250-160	160-100	100-63	63-40	40-20	>10
Титанат алюминия	3	5	8	18	22	24	10	4	6
$Al_6Si_2O_{13}$	18	10	12	9	9	14	13	6	9
$MgAl_{22}O_4$	9	7	10	18	16	10	12	6	12

мкм 10 мас.%. Смесь порошков увлажняли 5% раствором ПВА, перемешивали и прессовали при одноосном давлении 900 МПа. с выдержкой 5-7 сек. Отформованные изделия просушивали при комнатной температуре до остаточной влажности не более 1% отн. Обжиг фильер проводили при 1450°C, 2 часа. Лучшие результаты были получены при повышении температуры спекания до 1500°C и времени 20 минут. Керамические фильеры для слива стекломассы, полученные методом шликерного литья и прессованием показаны на рис. 2.

Полученные результаты показали целесообразность использования гелиоматериалов для получения керамики с высокими термомеханическими свойствами и химической устойчивостью. Несмотря на то, что можно было ожидать худших свойств керамики из “плавленных” гелиоматериалов из-за их малой активной поверхности и, как следствие, предполагаемой плохой спекаемости, свойства полученной керамики определяли нивелирование негативного влияния малой активной поверхности, что объясняет

преимущественно, метастабильным состоянием материалов, полученных закалкой расплава. Гелиотехнология синтеза стабилизированного титаната алюминия, муллита, шпинели основана на резком охлаждении расплава, в результате чего целевой материал находится в метастабильном состоянии, т.е. характеризуется избытком внутренней энергии и избыточным содержанием кислорода. При спекании керамики, т.е. переходе к равновесному состоянию, высвобождающаяся энергия метастабильного состояния является существенным эффективным вкладом в общую энергию спекания при отжиге. Поэтому керамика из материалов, полученных по описанной технологии, характеризуется хорошим спеканием, определяющим достаточную прочность. Высокая термостойкость обеспечивается анизотропией зерен, направленному росту которых, исключаяющему контактные напряжения на межзеренных границах и последующему распаду, способствуют градиентные условия, в которых осуществляется синтез и закалка расплава целевых материалов.

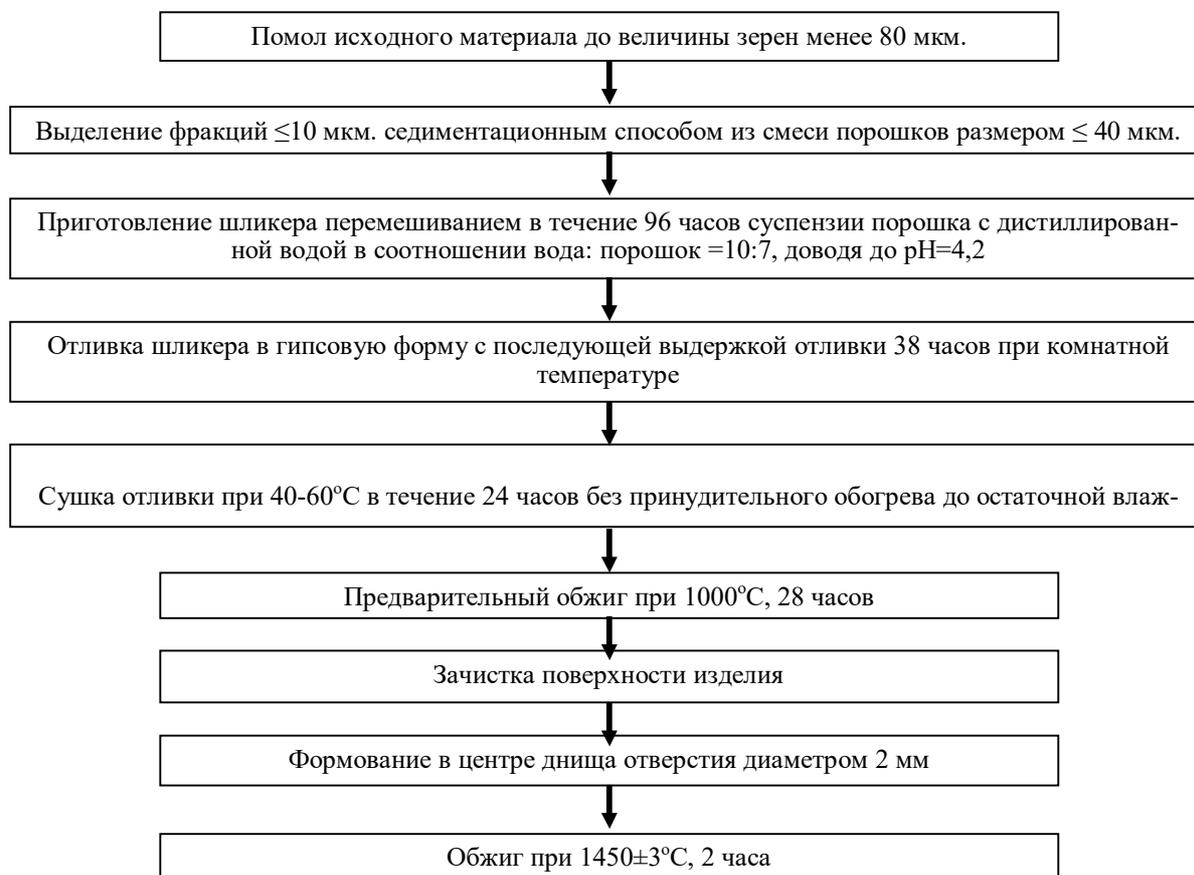


Рис. 2. Технология изготовления керамических фильер из плавленных титаната алюминия, шпинели, муллита методом шликерного литья.

Свойства керамики на основе титаната алюминия, муллита, шпинели, синтезированных солнечной энергией

Состав керамики, масс%	Пористость, открытая, %	Прочность на изгиб, МПа	Количество термоциклов, не приводящее к разрушению образца 1300 - 20°C в воду
(Al ₂ TiO ₅ .+MgO 15%)+Al ₆ Si ₂ O ₁₃ 15%	9.8	42.3	140
(Al ₂ TiO ₅ .+MgO 15%)+MgAl ₂ O ₄ 10%	8.2	38.7	125

Выводы

Энергоэкономная технология на основе солнечной энергии позволяет синтезировать керамические материалы для термостойкой прочной керамики.

Изменение режимов охлаждения расплава обеспечивает возможность регулировки размера зерна в целевом материале.

Отсутствие диффузионных зон на межзеренных границах облегчает помол.

Вклад внутренней энергии метастабильного состояния в процесс спекания плавляемых

порошков приводит к повышению прочности керамики, нивелируя негативное влияние малой активной поверхности порошков из плавляемых материалов.

Высокая термостойкость, удовлетворительная прочность керамики на основе материалов, синтезированных солнечной энергией, свидетельствуют о перспективе развития энерго-сберегающих экологических «зеленых технологий» для производства керамических материалов.

REFERENCES

- Kapustin R.D., Pervukhin L.B., Moyzis S.Ye. Eksperimental'no-teoreticheskoye issledovaniye protsessov termokhimicheskogo sinteza mullitovykh struktur v ognepornom pokrytii na osnove materiala marki M-1 [An experimental and theoretical study of the processes of thermochemical synthesis of mullite structures in a refractory coating based on material of the M-1 brand]. *Polzunovskiy Vestnik*, 2009, no. 1-2, pp. 267-272.
- Adylov G.T., Mansurova E.P., Riskiyev T.T. Sintez al'yumomagnitovoy shpineli na solnechnoy pechi i nekotoryye svoystva materialov na yeyo osnove [Synthesis of aluminum-magnesium spinel on a solar furnace and some properties of materials based on it]. *Geliotekhnika*, 2002, no. 4, pp. 62-69.
- Suvorov S.A., Rusinov A.V., Fishchev V.N., Alekseyeva N.V. Vysokotemperaturnyye materialy s nizkim intergal'nym koeffitsiyentom termicheskogo rasshireniya [High temperature materials with low intergal coefficient of thermal expansion]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2008, no. 2, pp. 11-17.
- Zhihua Hu, Xianbo Liao and all. Amorphous silicon carbide films prepared by H₂ diluted silane-methane plasma. *Journal of crystal Growth*, 2004, vol. 264, no. 1-3, pp. 7-12.
- Satapathy L.N., Ramech P.D., Dinech Agrawal and Rustum Roy. Microwave synthesis of phase-pure, fine silicon carbide powder. *Materials Research Bulletin*, 2005, vol. 40, no. 10, pp. 1871-1882.
- Ir-Jin Kim, Kee Sung Lee. Characterization of aluminum titanate-mullite ceramics synthesized by a semi sol-gel method. *Journal of Ceramic Processing research*, 2003, vol. 4, no. 4, pp. 202-209.
- Tarasovskiy V.P., Lukin Ye.S. K voprosu o sinteze titanata alyuminiya [On the synthesis of aluminum titanate]. *Novyye ogneupory*, 1986, no. 1, pp. 21-25.
- Dabizha A.A., Dabizha N.A., Yakushkina V.S., Smirnova I.B. Thermomechanical properties of ceramics in the systems Al₂O₃-TiO₂ and Al₂O₃-TiO₂-mullite. *Refractories and industrial ceramics*, 1988, vol. 29, no. 1-2, pp. 96-101.
- Athena Tsetsekou. A comparison study of tialite ceramics doped various oxide materials and tialite-mullite composites: microstructure, thermal and mechanical properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, vol. 25, no. 4, pp. 335-348.
- Lukin Ye.S. Sovremennaya vysokoplotnaya oksidnaya keramika s reguliruyemoy mikrostrukturoy [Modern high-density oxide ceramic with adjustable microstructure]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 1996, no. 1, pp. 5-14.
- Meléndez-Martínez J.J., Jiménez-Meléndez M., Domínguez-Rodríguez A., Wötting G. High temperature mechanical behavior of aluminum titanate-mullite composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 1997, vol. 17, no. 10, pp. 1239-1246.
- Riskiyev T.T., Gulamova D.D. Svoystva oksidnykh materialov, sintezirovannykh v solnechnoy pechi [Properties of oxide materials synthesized in a solar furnace]. *Doklady AN RUz*, 2014, no. 2, pp. 14-19.
- Baum V.A. Solnechnyye vysokotemperaturnyye pechi. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1960. 470 p.
- Gulamova D.D., Ismailova T.YU., Akhmedov M.KH., Uskenbayev D.Ye. Turdiyev ZH.SH. Svoystva sferulitov oksidnykh soyedineniy, poluchennykh iz rasplava na Solnechnoy pechi [Properties of spherulites of oxide compounds obtained from a melt in the solar furnace]. *Geliotekhnika*, 2007, no. 1, pp. 74-77.
- Gulamova D.D., Uskenbayev D.Ye., Turdiyev ZH.SH., Mitrofanov YU. Toshmurodov O. Termostoykaya keramika s povyshennoy mekhanicheskoy prochnost'yu na osnove titanata alyuminiya, poluchennogo pod vozdeystviyem kontsentrirovannogo solnechnogo izlucheniya [Heat-resistant ceramic with increased mechanical strength based on aluminum titanate obtained under the influence of concentrated solar radiation]. *Geliotekhnika*, 2010, no. 1, pp. 53-56.
- Fiziko-khimicheskiye metody issledovaniya keramiki* [Physico-chemical methods for the study of ceramics]. Novosibirsk, Novosibirskoye otdeleniye RAN Publ., 2006. 116 p.
- Gulamova D.D., Uskenbayev D.Ye., Turdiyev ZH.SH., Mitrofanov YU., Bobokulov S. Issledovaniye keramiki na osnove titanata alyuminiya i dobavok, poluchennykh v solnechnoy pechi, metodom tverdogfaznykh reaktsiy i induktsionnym metodom [The study of ceramics based on aluminum titanate and additives obtained in a solar furnace, the method of solid-phase reactions and induction method]. *Geliotekhnika*, 2010, no. 2, pp. 47-51.
- Gulamova D.D., Sarkisova M.KH., Suleymanov S.KH. Avtorskoye svidetel'stvo SSSR 240778, MKI C04B 35/10.
- Gulamova D.D., Sarkisova M.H. Influencing of the compositions and method of synthesis on the properties of ceramics of the basis of aluminum titanate. *Refractories*, 1993, vol. 7, pp. 18-21.
- Gulamova D.D. Influencing of features of a microstructure on stability of aluminum titanate. *Refractories*, 1991, vol. 5, pp. 2-4.
- Chun-Hong Chen, Hideo Awajia, Temperature dependence of mechanical properties of aluminum titanate ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, vol. 27, no. 1, pp. 13-18.
- Suvorov S.A., Fishchev V.N., Shadracheva D.B., Firsanova T.V., Alekseyeva N.V. Plavkost' kompozitsiy na osnove faz sistemy shpinel'-mullit-titanat alyuminiya [Meltability of compositions based on phases of the spinel-mullite-titanate aluminum system]. *Prikladnaya khimiya*, 2004, vol. 77, no. 1, pp. 7-12.