



УДК 534.2:536.46 + 666.76

Поступила 20.11.2015

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИИ СВС-ШИХТЫ НА КОНЕЧНЫЙ ПРОДУКТ

EFFECT OF ULTRASOUND ACTIVATION OF SHS-CHARGE ON THE FINAL PRODUCT

^{1,2}В. В. КЛУБОВИЧ, ²М. М. КУЛАК, ¹В. И. МАРУСИЧ, ²В. Г. САМОЛЕТОВ, ¹Е. В. ХРУЩЕВ,
¹ Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65,
² Государственное научное учреждение «Институт технической акустики НАН Беларуси»,
г. Витебск, Беларусь, пр. генерала Людникова, 13. E-mail: mmk_vit@mail.ru.

^{1,2}V. V. KLUBOVICH, ²M. M. KULAK, ¹V. I. MARUSICH, ²V. G. SAMOLETOV, ¹E. V. KHRUSCHEV,
¹ Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave.,
² Institute of Technical Acoustics, Vitebsk, Belarus, 13, Prospekt Generala Ljudnikova.
E-mail: mmk_vit@mail.ru.

В статье приведены данные о влиянии ультразвуковой активации доломита, применяемого для получения огнеупорного материала. Проведенные рентгеновские исследования показали, что ультразвуковая активация шихты приводит к изменению фазового состава конечных продуктов синтеза.

The paper describes the effect of ultrasound activation of dolomite, which is used for producing refractory material by the SHS method, on the final product. X-ray investigation has demonstrated that ultrasound activation of the initial charge brings about changes in the phase composition of the synthesized product.

Ключевые слова. Ультразвуковая активация, огнеупорные материалы, доломит, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, рентгеновские исследования, продукт синтеза.

Keywords. Ultrasound activation, refractory materials, dolomite, self-propagating high-temperature synthesis, X-ray investigation, synthesis product.

Материалы на основе минерального сырья, отличающиеся способностью сохранять свои свойства в условиях эксплуатации при высоких температурах, называются огнеупорными.

Эксплуатационные свойства огнеупорных материалов определяются комплексом химических, физико-химических и механических свойств. Основное свойство огнеупорных материалов – огнеупорность, т. е. способность материала противостоять, не расплавляясь, действию высоких температур. Огнеупорность характеризуется температурой, при которой стандартный образец из материала в форме трехгранной усеченной пирамиды высотой 30 мм и сторонами оснований 8 и 2 мм (конус Зейгера) размягчается и деформируется так, что его вершина касается основания. Определенная таким образом температура обычно выше максимально допустимой температуры эксплуатации огнеупорного материала. Различают собственно огнеупорные материалы (огнеупорность 1580–1770 °С), высокоогнеупорные (1770–2000 °С) и материалы высшей огнеупорности (выше 2000 °С).

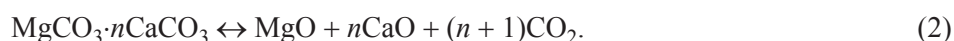
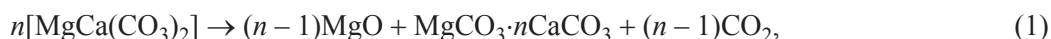
Другие важные свойства огнеупорных материалов – пористость, термическая стойкость, теплопроводность, температура начала деформации под нагрузкой и химическая стойкость в различных средах. По пористости (объемной доле пор, %) различают особо плотные огнеупорные материалы (пористость менее 3%), высокоплотные (3–10%), уплотненные (16–20%), материалы повышенной пористости (20–30%), легковесные (45–75%) и ультралегковесные (75–90%). К последним обычно относят волокнистые огнеупорные материалы. Высокоогнеупорные материалы и материалы высшей огнеупорности обладают, как правило, малой пористостью. Их микроструктура представляет собой контактирующие друг с другом крупные зерна, между которыми располагаются более мелкие зерна и большая часть пор. Ог-

неупорные материалы могут быть формованными – кирпичи, бруски, трубы, фасонные изделия и неформованными – порошки, обмазки, смеси для огнеупорных бетонов и др.

Все огнеупорные материалы в зависимости от используемого сырья разделяются на следующие виды: динасовые, кварцевые, полукислые, шамотные, доломитовые, форстеритовые, магнезитовые (периклазовые), шпинельные и др. [1].

Сырьевых запасов для производства алюмосиликатных (огнеупорных глин, бокситов) и периклазовых огнеупоров Беларусь не имеет, но располагает практически неограниченной сырьевой базой для производства доломитовых огнеупоров.

Доломитовые огнеупоры изготавливают из минерала доломита, представляющего собой в чистом виде двойную углекислую соль магния и кальция ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$) и еще с десятков оксидов. Природный доломит содержит еще SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 и некоторые другие примеси. При нагревании доломит разлагается последовательно по реакциям:

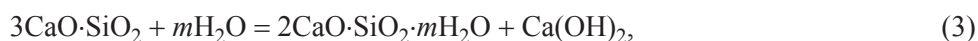


Реакция (1) необратима и происходит при 1023 К, реакция (2) обратима и происходит при 1223 К. Обратимость реакции (2) заключается в том, что оксид кальция интенсивно поглощает воду из воздуха при охлаждении и отдает ее при нагревании, при этом значительно изменяются его плотность (почти в 2 раза) и объем, доломитовый камень рассыпается в порошок. Тем не менее, огнеупоры из доломита производят. Применяют два способа, чтобы избежать гидратации оксида кальция:

- 1) покрытие зерен извести смолой или пеком и таким путем изолируют их от паров воды;
- 2) связывание свободного оксида кальция кремнеземом (стабилизация доломита).

Смолодоломитовые изделия получают, смешивая порошок и зерна доломита с расплавленной смолой или битумом и прессуя смесь в формы. При этом используют как сырой, так и обожженный доломит. При нагревании изделий выше 670 К происходит коксование смолы и изделие затвердевает. Если используется сырой доломит, а коксующий обжиг совмещен с первым нагревом смонтированной футеровки, то технология не требует больших энергозатрат. Однако смолодоломитовые изделия имеют два существенных недостатка: низкую прочность изделия при первом нагреве при температурах 470–570 К и опасность гидратации в процессе эксплуатации из-за выгорания углерода [1].

Исследование возможности производства огнеупорного мертеля и формованных изделий с использованием стабилизированного доломита проводили в НИИ строительных материалов (УП НИИСМ) [2]. Одна из проблем, как отмечено выше, состоит в том, что в доломите при нагревании образуется оксид кальция, который реагирует с водой при производстве огнеупорных изделий, увеличиваясь в объеме, и обезвоживается при нагревании в процессе эксплуатации, уменьшаясь в объеме. По этой причине изделия и покрытия из доломита теряют свою прочность при нагревании выше 1070 К. Стабилизировать доломит можно, добавляя в него перед обжигом кремнезем SiO_2 . Если к доломиту добавить кремнезем до соотношения $M_{CaO}:M_{SiO_2} = 2,8$ (где M_{CaO} и M_{SiO_2} – массы оксида кальция и кремнезема), то образуется алит – трехкальциевый силикат $3CaO \cdot SiO_2$, если соотношение $M_{CaO}:M_{SiO_2} = 1,87$, то образуется белит – двухкальциевый силикат $2CaO \cdot SiO_2$, и наконец, при $M_{CaO}:M_{SiO_2} = 0,933$ образуется волластонит – однокальциевый силикат $CaO \cdot SiO_2$. Волластонит с водой не взаимодействует, алит и белит при соединении с водой образуют кристаллогидраты – этим объясняются вяжущие свойства цемента и доломита:



Но алит при гидратации опять образует гидроксид кальция, который разрушает цементный камень. Поэтому надо дополнительно вводить в смесь кремнезем до соотношения $M_{CaO}:M_{SiO_2} \geq 1,87$, чтобы основная масса оксида кальция при обжиге образовала с оксидом кремния соединение белит.

На этом проблема стабилизации доломита не исчерпывается, так как белит имеет три модификации: α , β и γ . Переход $\alpha \rightarrow \beta$ происходит при 1713 К без изменения объема, а переход $\beta \rightarrow \gamma$ при 1113 К сопровождается увеличением объема на 10%, что при большом количестве силиката приводит всю массу к рассыпанию. Для стабилизации белита в смесь добавляют апатит P_2O_5 или соединение ортофосфорной кислоты, которое образует с β -белитом твердый раствор и стабилизирует его [3]. Стабилизированный таким образом доломит можно использовать для производства как штучных изделий, так и мерте-

ля. Недостаток технологии в том, что необходим длительный обжиг смеси при температуре не ниже 1923 К. Для выпуска в Беларуси доломитовых огнеупоров по этой технологии требуется модернизация обжиговых печей.

Современные технологические процессы литейно-металлургического, химического и других производств, осуществляемые с использованием различных печей и реакторов, предъявляют все более высокие требования к футеровке их рабочего пространства. Наряду с высокой температурой футеровка испытывает комбинированное воздействие жидких и газообразных агрессивных сред, истирающее и раскалывающее воздействие, динамические и ударные нагрузки, термоциклические нагрузки, воздействие электрического напряжения. В ряде случаев традиционные огнеупорные материалы и способы футеровки не могут обеспечить необходимый комплекс свойств – сочетание прочности, износостойкости, коррозионной и термической стойкости.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) – этот физико-химический эффект был открыт А. Г. Мержановым с сотрудниками в 1967 г. [4]. Это открытие легло в основу нового научного направления на стыке материаловедения и химической физики – структурной макрокинетики СВС-процессов, которое активно развивается с начала 70-х годов XX в. Уникальность СВС состоит в том, что полное превращение реагентов в продукты, для которого при традиционном печном синтезе требуется время порядка 1–10 ч, при СВС достигается за считанные секунды. В этом смысле СВС представляет собой «исключение из правил». В конденсированных средах взаимодействие реагентов, т. е. рост сплошного слоя или отдельных частиц новой фазы–продукта, лимитируется, как правило, подводом атомов к межфазной границе, на которой происходит химическая реакция. В твердых веществах подвод атомов осуществляется за счет твердофазной диффузии, т. е. достаточно медленно, этим и обусловлена большая длительность реагирования в традиционных процессах синтеза. В волне СВС достигаются экстремальные условия (высокая температура – до 4000 °С, большая скорость нагрева – до 106 К/с и резкий градиент температуры – до 105 К/см) и скорость горения достаточно велика (для большинства неорганических систем – в пределах 0,1–10 см/с). В силу этого в ней реализуются необычные с точки зрения традиционного физического материаловедения механизмы фазо- и структурообразования, которые и составляют предмет структурной макрокинетики СВС-процессов. Продукты СВС обычно обладают мелкозернистой структурой, которая определяет уникальные свойства получаемого материала. Это связано с необычными с точки зрения классического материаловедения механизмами фазо- и структурообразования, которые работают во время СВС.

При всех достоинствах СВС-процессов им присущ ряд ограничений: СВС протекает в узкой области параметров и плохо поддается контролю после инициирования; управление обычно сводится к изменению состава и начальной температуры шихты. В связи с этим создание новых материалов и СВС-технологий возможно только на основе фундаментальных исследований влияния внешних воздействий на фазо- и структурообразование при СВС. В литературе приводятся многочисленные данные о том, что внешнее физическое воздействие, в частности электромагнитное поле, приложенное во время синтеза, изменяет кинетику горения, структуру и свойства продукта [5–7], причем эти наблюдаемые эффекты невозможно свести только к тепловому влиянию (например, выделение джоулевой теплоты при пропускании электрического тока через образец, анализ которого проведен в работах [8, 9]).

Изучение самораспространяющегося высокотемпературного синтеза ведется на стыке химической физики, физики твердого тела и материаловедения: исследование теории процессов СВС происходит на базе науки о горении, а изучение продуктов СВС – с помощью методов и представлений, развитых в физике твердого тела и материаловедении тугоплавких соединений.

Макрокинетические характеристики процессов СВС, структура и свойства продуктов синтеза определяются множеством физических, технологических и химических свойств порошков исходных реагентов и их экзотермических смесей, начальной температурой, составом и размером шихтового брикета, давлением газа, наличием внешних физических воздействий, другими параметрами, присущими конкретному технологическому типу СВС-процесса. Поэтому для разработки научных принципов управления процессами и продуктами СВС необходимо установить закономерности влияния перечисленных параметров на структуру и свойства целевого продукта. Однако использование традиционных методик, предусматривающих регулирование процессов СВС путем изменения внешнего давления, начальной температуры, параметров смеси, нередко бывает ограничено, например, в силу слабой зависимости реакции от давления, температуры или определенных требований, предъявляемых к составу смеси. В таких случаях большие возможности для управления СВС может дать применение воздействий физиче-

ских полей, зарекомендовавших себя в практике горения порохов и ракетных топлив, литья сплавов, спекания порошков и других процессах. В связи с этим практический и научный интерес представляет изучение воздействия физических полей на закономерности СВС, направленное на поиск новых путей управления и исследования реакций и являющееся реальной основой для разработки гибких технологических процессов получения СВС-продуктов, обладающих необходимыми свойствами.

Среди систем, способных к СВС, значительный интерес представляют системы с восстановительной стадией. Горение в таких системах имеет две принципиально различные стадии – восстановление элементов из оксидов и вслед за ней взаимодействие элементов между собой и с добавками. Типичными представителями таких систем могут служить тонкодисперсные сухие смеси $\text{SiO}_2 + \text{Al}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ и др.

С практической точки зрения с целью получения разнообразных продуктов строительного назначения (футеровочные материалы, огнеупоры, легкие ячеистые бетоны, тепло- и огнезащитные материалы) предпочтение имеют смесевые СВС-системы, содержащие диоксид кремния (SiO_2), поскольку этот материал составляет основу большинства природных материалов и отходов стройиндустрии [3]. Среди множества разработок в этом направлении заслуживают внимания исследования проф. В. М. Мальцева [10]. В работе на примере смесей $\text{SiO}_2 + \text{Al}$ была доказана возможность получения огнеупорных жаростойких материалов муллитовой структуры общего состава $x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{SiO}_2$, где $x = 68\text{--}70\%$, $y = 30\text{--}32\%$ по массе.

СВС-процессы обычно протекают в узкой области параметров, например, размер исходных частиц, состав, относительная плотность образца и др. Для изменения температуры горения T_c и условий гетерогенного взаимодействия в волне СВС обычно меняют химический состав исходной шихты или проводят ее дополнительную обработку, например: а) разбавление инертным веществом для снижения T_c ; б) введение реагентов, обеспечивающих дополнительные экзотермические реакции (повышение T_c); в) добавление небольших количеств летучих добавок-активаторов, которые инициируют газотранспортные процессы в волне горения; г) подогрев шихты, т. е. внесение дополнительной энтальпии в зону реакции; д) механоактивация порошковой смеси в высокоэнергонагруженной шаровой мельнице [11], что уменьшает характерный размер реагентов, повышает площадь контакта и создает большое количество дефектов в их кристаллической структуре.

В данной работе описаны способ и устройство для ультразвуковой активации исходной шихты (доломита) и других составов, а также влияние ультразвуковых колебаний на свойства конечного продукта при синтезе методом СВС.

В работе использовали доломит (ГОСТ 14050-93), пудру алюминиевую (ГОСТ 5494-95), жидкое стекло (ГОСТ 13078-81) и песок строительный. После взвешивания компонентов смешивание осуществляли в керамической ступке с последующим перемешиванием в смесителе «Turbula» в течение 4 ч. Затем в смесь порошков для увеличения механической прочности вводили связку на основе жидкого стекла. Соотношение компонентов: доломит (25%), пудра алюминиевая (31%), жидкое стекло (17%), песок строительный (остальное). Далее из полученных смесей методом глухого прессования изготавливали образцы диаметром 30 мм и высотой 20–25 мм. Активацию доломита проводили в герметичном стакане, через крышку которого был подведен ультразвуковой концентратор. Частота колебаний составляла 22 кГц. Амплитуду колебаний изменяли в пределах 5–30 мкм, время ультразвуковой обработки составляло 20 мин.

На рис. 1 приведена блок-схема установки для ультразвукового помола исходных порошков (доломита) [12].

Устройство работает следующим образом. Порция механоактивируемого порошка 5 помещается в рабочую зону 3, выполненную в виде камеры с размерами, создающими условия для резонанса. Камера устанавливается на ультразвуковом отражателе 6 полуволновой длины, он позволяет изолировать массу рабочего стола 8 и сконцентрировать всю энергию ультразвука в рабо-

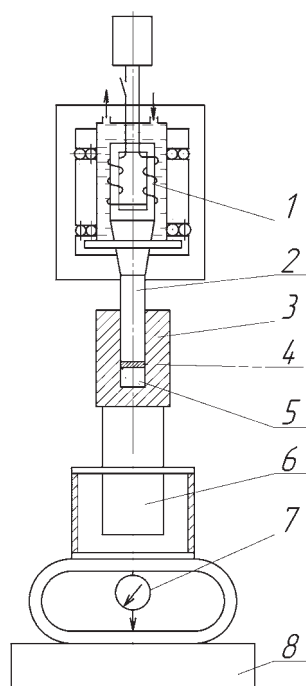


Рис. 1. Блок-схема установки ультразвукового помола и активации порошков: 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – волновод; 3 – стакан; 4 – измельчитель; 5 – механоактивированный порошок; 6 – полуволновой отражатель; 7 – динамометр; 8 – рабочий стол

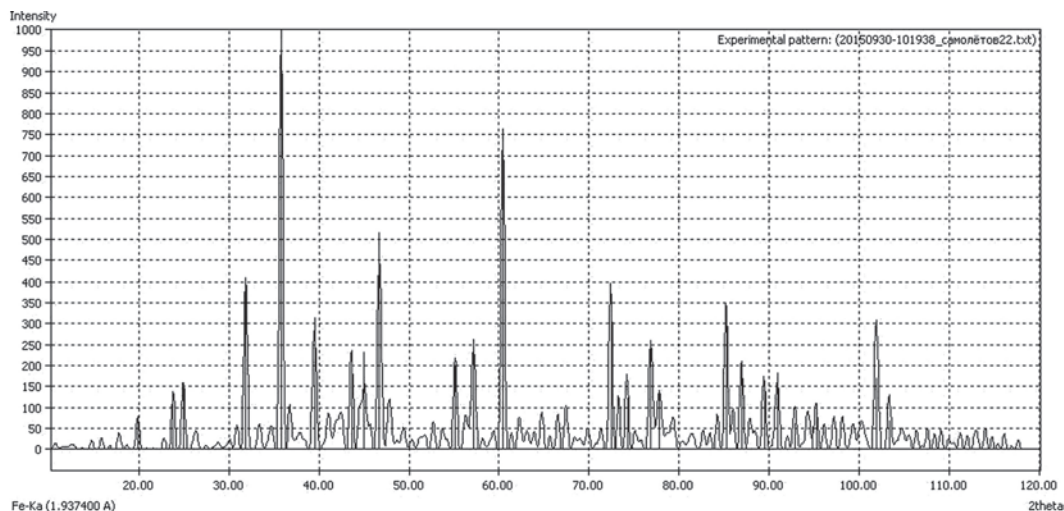


Рис. 2. Рентгенограмма образца без активации шихты. Сжигание в печи на воздухе

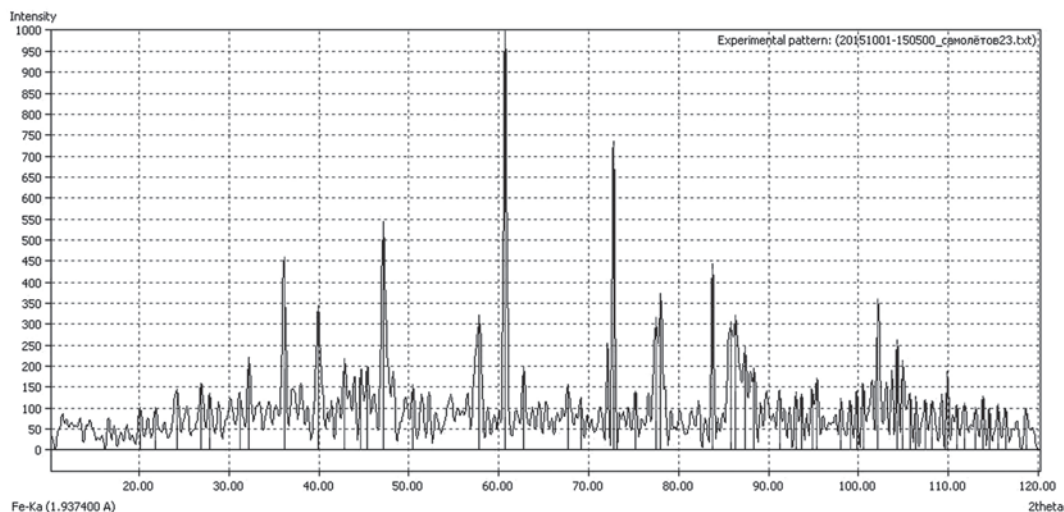


Рис. 3. Рентгенограмма образца после ультразвуковой активации шихты. Сжигание в печи на воздухе

чем объеме активируемого порошка 5. Отражатель 6 полуволновой длины смонтирован на динамометре 7 для обеспечения и контроля постоянной силы поджима механического измельчителя 4. В механическом измельчителе 4, механически связанном через концентратор 2 ультразвуковых колебаний, при помощи источника 1 ультразвуковых колебаний возбуждаются механические колебания ультразвуковой частоты. Механический измельчитель 4 вводится в рабочую зону 3 камеры определенным усилием, и в течение некоторого времени происходит активное измельчение механоактивируемого порошка 5 за счет многократных ударов торца механического измельчителя 4.

Синтез проводили двумя способами: в первом случае спрессованные образцы помещали в печь, разогретую до 1000 °С на воздухе, во втором случае синтез проводили в бомбе постоянного давления в среде аргона при давлении 1 МПа с предварительным подогревом до 500 °С.

Синтезированные образцы имели совершенно разный вид. Образцы, синтезированные при атмосферном давлении, расслоились и их высота увеличилась примерно в 2,0–2,5 раза. Вместе с тем, образцы, синтезированные при давлении 1 МПа, сохранили свою форму и сплошность.

Конечные продукты синтеза исследовали методом рентгенографического анализа на дифрактометре ДРОН-2 при использовании FeK_{α} -излучения. Так как уже отмечалось выше, в состав доломита входят более десяти оксидов металлов, исследование фазового состава затруднено. Поэтому были проведены панорамные съемки образцов, синтезированных в описанных выше условиях.

На рис. 2, 3 приведены полученные рентгенограммы образцов, синтезированных при атмосферном давлении на воздухе.

Сравнительный анализ рис. 2, 3 показывает, что спектр образцов после активации имеет совершенно другой вид. Дифракционные пики имеют другую интенсивность и местоположение. Все это позволяет

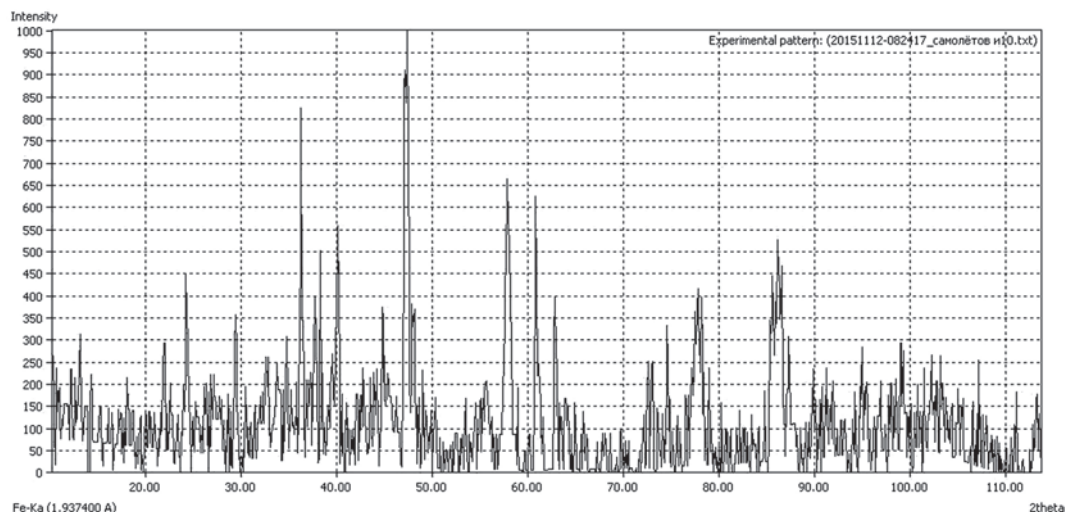


Рис. 4. Рентгенограмма образца без активации шихты. Сжигание в среде аргона при давлении 1 МПа

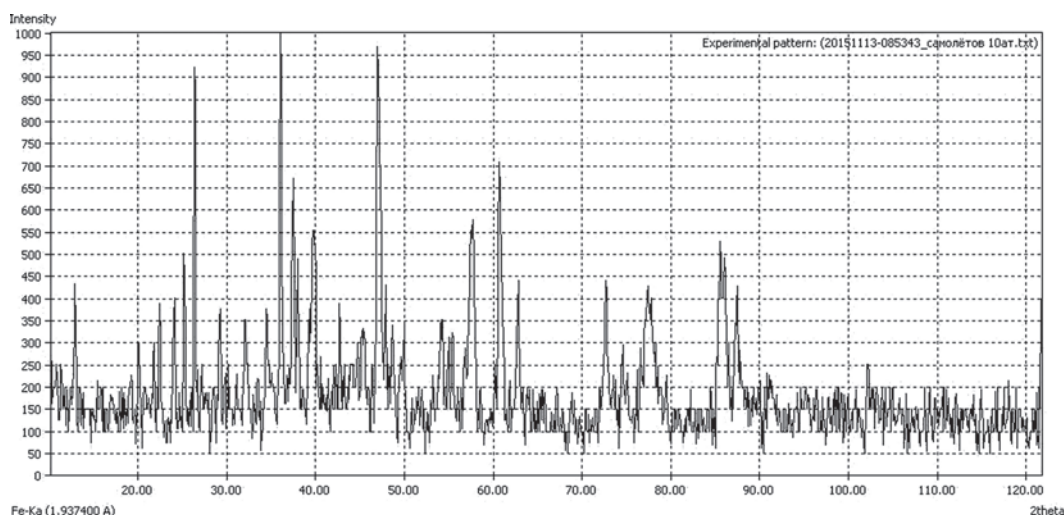


Рис. 5. Рентгенограмма образца после ультразвуковой активации шихты. Сжигание в среде аргона при давлении 1 МПа

сделать вывод, что синтезированные образцы обладают разным фазовым составом. Еще большая разница видна на рентгенограммах образцов, синтезированных в среде аргона при давлении 1 МПа (рис. 4, 5).

Из рисунков видно, что процесс структурообразования в данной системе в зависимости от условий подготовки шихты и синтеза носит различный характер. Дальнейшие исследования по изучению характеристик полученных огнеупоров позволят определить влияние ультразвуковой активации на исходную шихту и выработать требования к обработке шихты с целью получения огнеупорных материалов на основе доломита с более высокими эксплуатационными характеристиками.

Анализ рентгенограмм показывает, что ультразвуковая активация шихты приводит к изменению фазового состава конечных продуктов синтеза. На основании имеющихся данных можно сделать вывод, что ультразвуковая активация исходной шихты является эффективным способом, позволяющим влиять на реакционную способность шихты и изменять процессы структурообразования конечного продукта.

Литература

1. Стрелов К. К. Технология огнеупоров / К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. 3-е изд. М.: Металлургия, 1978. 329 с.
2. Доломитовый огнеупор: пат. РФ 6910 / И. А. Белов, Л. В. Соколовский, Е. Я. Подлuzский, О. Г. Бачевичус; заявитель Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие «НИИСМ». № 20011108; заявл. 2001.12.27.
3. Хина Б. Б. Применение СВЧ для получения огнеупорных материалов и изделий на основе SiC и Al₂O₃ / Б. Б. Хина, Е. М. Дятлова, В. В. Саранцев, К. Б. Подболотов, А. Ю. Повстяной // Огнеупоры и техническая керамика. 2006. № 10. С. 2–13.
4. Мержанов А. Г., Боровинская И. П., Шкиро В. М. Явление волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций. Диплом СССР на открытие № 287. Опул. в бюл. изобр. 1984. № 32. С. 3.
5. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Мержанов А. Г. Нетепловое воздействие электрического поля на процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Доклады Российской Академии наук. 1997. Т. 352, № 6. С. 771–773.

6. Morozov Yu. G., Kuznetsov M. V., Merzhanov A. G. Electric fields in the processes of self-propagating high-temperature synthesis // *International Journal of SHS*. 1997. Vol. 6, № 1. P. 1–13.
7. Microstructural aspects of the self-propagating high temperature synthesis of hexagonal barium ferrites in an external magnetic field / L. Affleck, M. D. Aguas, I. P. Parkin, Q. A. Pankhurst, M. V. Kuznetsov // *Journal of the Materials Chemistry*. 2000. Vol. 10. P. 1925–1932.
8. Feng A., Munir Z. A. Effect of product conductivity on field-activated combustion synthesis // *Journal of the American Ceramic Society*. 1997. Vol. 80, no. 5. P. 1222–1230.
9. Mechanistic investigation of electric field-activated self-propagating reactions: experimental and modeling studies / R. Orru, A. Cincotti, G. Cao, Z. A. Munir // *Chemical Engineering Science*. 2001. Vol. 56, no. 2. P. 683–692.
10. Муллитовый материал для производства огнеупорных изделий: пат. RU 2101263 K1CO4B 35/66, 41/87 / В. М. Мальцев, Г. П. Гафиятуллина, Л. А. Уваров, В. Т. Волков, Н. И. Жуков, Н. К. Егоров. 1998.
11. Корчагин М. А., Ляхов Н. З. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в механически активированных составах // *Химическая физика*. 2008. Т. 27, № 1. С. 73–78.
12. Устройство для ультразвукового помола порошка. Пат. BY 19076 от 30.04.2015. В. В. Клубович, В. А. Томило, Е. В. Хрущев, А. С. Липницкий, В. И. Марусич, А. В. Абрамова.

References

1. Strelov K. K., Mamykin P. S. *Tehnologija ogneuporov* [Technology of refractories]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 329 p.
2. Belov I. A., Sokolovskij L. V., Podluzskij E. Ja., Bacevichus O. G. Dolomitovyj ogneupor [Dolomite refractory]. *Patent of Belarus*, no. 6910, 2001.
3. Hina B. B., Djatlova E. M., Sarancev V. V., Podbolotov K. B., Povstjanov A. Ju. Primenenie SVS dlja poluchenija ogneupornyh materialov i izdelij na osnove SiC i Al₂O₃ [Application of SAF for refractory materials and products based on SiC and Al₂O₃]. *Ogneupory i tehnickeskaja keramika = Refractories and Technical Ceramics*, 2006, no. 10, pp. 2–13.
4. Merzhanov A. G., Borovinskaja I. P., Shkiro V. M. Javlenie volnovoј lokalizacii avtotormozjashhihsja tverdo-faznyh reakcij [The phenomenon of wave localization avtotormozyaschihsya solid state reactions]. Diplom SSSR na otkrytie № 287 [Diploma of the USSR in the opening number 287]. *Bjulleten izobretenij = Bulletin of Inventions*, 1984, no. 32, p. 3.
5. Morozov Ju. G., Kuznetsov M. V., Merzhanov A. G. Neteplovoe vozdejstvie jelektricheskogo polja na process samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza [Non-thermal effects of the electric field in the process of SHS]. *Doklady RAN = Reports of the Russian Academy of Sciences*, 1997, vol. 352, no. 6, pp. 771–773.
6. Morozov Yu. G., Kuznetsov M. V., Merzhanov A. G. Electric fields in the processes of self-propagating high-temperature synthesis. *International Journal of SHS*. 1997, vol. 6, no. 1. pp. 1–13.
7. Microstructural aspects of the self-propagating high temperature synthesis of hexagonal barium ferrites in an external magnetic field. L. Affleck, M. D. Aguas, I. P. Parkin, Q. A. Pankhurst, M. V. Kuznetsov. *Journal of the Materials Chemistry*. 2000, vol. 10. pp. 1925–1932.
8. Feng A., Munir Z. A. Effect of product conductivity on field-activated combustion synthesis. *Journal of the American Ceramic Society*. 1997, vol. 80, no. 5, pp. 1222–1230.
9. Mechanistic investigation of electric field-activated self-propagating reactions: experimental and modeling studies / R. Orru, A. Cincotti, G. Cao, Z. A. Munir. *Chemical Engineering Science*. 2001, vol. 56, no. 2. pp. 683–692.
10. Mal'cev V. M., Gafijatulina G. P., Uvarov L. A., Volkov V. T., Zhukov N. I., Egorov N. K. Mullitovyj material dlja proizvodstva ogneupornyh izdelij [Mullite material for the production of refractory products]. *Patent RU*, no. 2101263, K1SO4V 35/66, 41/87, 1998.
11. Korchagin M. A., Ljahov N. Z. Samorasprostranjajushhihsja vysokotemperaturnyj sintez v mehanicheski aktivirovannyh sostavah [Self-propagating high temperature synthesis in a mechanically activated compositions]. *Himicheskaja fizika = Chemical Physics*, 2008, vol. 27, no. 1, pp. 73–78.
12. Klubovich V. V., Tomilo V. A., Hrushhev E. V., Lipnickij A. S., Marusich V. I., Abramova A. V. Ustrojstvo dlja ul'trazvukovogo pomola poroshka [Device for ultrasonic grinding powder]. *Patent BY*, no. 19076. 30.04.2015.