

К. т. н. **К. Б. Подболотов** (✉)

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск,
Республика Беларусь

УДК 666.762.11.043.2-127:[666.76.002.68+661.63

ОГНЕУПОРНЫЕ ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ И ФОСФАТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Приведены результаты исследований пористых огнеупорных материалов, полученных в ходе химических и экзотермических реакций на основе систем, содержащих вторичные ресурсы (бой шамота, муллитсодержащие отходы, шлак плавки алюминия), алюмофосфатное связующее, алюминий, огнеупорную глину и различные добавки. Установлены температурные зависимости теплоемкости и теплопроводности получаемых материалов в диапазоне 30–1000 °С. Показано, что оптимальное суммарное содержание алюминия и шлака в смеси для получения пористых материалов составляет 10–20 %. Установлено, что введение добавок магнезита и хромагнезита, а также дигидрофосфата аммония позволяет регулировать плотность и прочность получаемых материалов.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), АФС, шлак плавки алюминия (ШПА), пористые теплоизоляционные материалы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение нашли пористые проницаемые материалы для теплоизоляции, фильтрации и очистки. Особый интерес представляют проницаемые системы, способные работать при высоких температурах и в условиях резких температурных перепадов. Наряду с традиционными технологиями получения пористых материалов, которые подразумевают спекание фракционированных порошков определенной дисперсности в смеси со связующими веществами (причем для увеличения пористости в некоторых случаях вводят выгорающие или газообразующие добавки), ведутся разработки по получению данных материалов при помощи экзотермических процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Высокая стоимость сырьевых материалов, в том числе порошков металлов, и энергоресурсов заметно удорожает конечную огнеупорную продукцию, а зачастую ограничивает ее использование. В связи с этим главными направлениями в производстве огнеупоров являются разработка отечественных материалов, расширение их ассортимента и рациональное использование. Анализ состояния и основных направлений совершенствования производства огнеупоров [1] указывает на преимущество развития безобжиговой технологии. В качестве связующего наиболее перспективным следует

считать фосфатные соединения, которые хорошо зарекомендовали себя в технологии огнеупоров, обеспечивая высокую термостойкость и прочность огнеупорного материала при высоких температурах [2, 3]. Алюмофосфатные связки (АФС) — коллоидные растворы алюмофосфатов, полученные в результате взаимодействия гидрата технического глинозема с разбавленной ортофосфорной кислотой [4]. Алюмохромфосфатные связки (АХФС) — водный раствор смешанных фосфатов алюминия и хрома с общей формулой $Al_2O_3 \cdot xCr_2O_3 \cdot (xCrO_3) \cdot yP_2O_5 \cdot nH_2O$, алюмоборфосфатное связующее (АБФС) — продукт взаимодействия ортофосфорной и борной кислот с гидратом оксида алюминия. Согласно [5–7] фосфатные связующие применяются для изготовления высококачественных муллитокорундовых, корундовых, муллитовых изделий, предназначенных для эксплуатации в жестких условиях воздействия высоких температур, агрессивных сред, а также механических нагрузок. Хорошая вяжущая способность АФС, низкая температура отверждения и высокие адгезионные свойства обеспечивают широкое применение АФС в технологии получения высокоглиноземистых огнеупорных материалов. Эти преимущества АФС перед ортофосфорной кислотой полностью компенсируют относительно большую стоимость этих материалов, что связано с необходимостью применения дополнительного технологического процесса для приготовления АФС.

Перспективным для получения пористых материалов и изделий является метод химического вспучивания шихты с применением экзотермических реакций. При протекании ре-



К. Б. Подболотов
E-mail: kirilbor@gmail.com

акций происходит саморазогрев смеси до температур выше 100 °С, что позволяет исключить сушку изделий. Кроме того, применение этих смесей расширяет номенклатуру изделий ввиду их подвижности и способности заполнять практически любые формы. В ряду всевозможных систем, обеспечивающих химическое вспучивание с протеканием экзотермических реакций, можно выделить фосфатные системы, содержащие кислые фосфаты или ортофосфорную кислоту, которые обеспечивают интенсивное газовыделение при взаимодействии с активными металлами. Широкое распространение имеют фосфаты алюминия — алюмофосфатные связующие, которые характеризуются доступностью компонентов для синтеза и простотой получения. Материалы на основе АФС обладают высокими прочностью, термостойкостью и огнеупорностью. При использовании в качестве наполнителя огнеупорных соединений и отходов промышленности, а в качестве активного металла алюминия возможно проведение экзотермического процесса получения материалов при взаимодействии алюминия и АФС с образованием материала, в котором частицы наполнителя будут связаны алюмофосфатами, а ввиду газовыделения при синтезе будет обеспечиваться высокая пористость.

Установлено [8], что экзотермическая реакция между порошком алюминия и фосфатным связующим, сопровождающаяся значительным газо- и тепловыделением, обеспечивает формирование ячеистой фосфатной композиции. При этом максимальная температура реакции достигает 210–260 °С, что является достаточным для твердения материала. Конечные продукты синтеза — высокотемпературные фосфатные соединения с преобладанием AlPO_4 . Показано, что основным способом управления процессами структурообразования и свойствами такого материала является регулирование активности связующего путем изменения концентрации ортофосфорной кислоты и ее частичной нейтрализации, например соединениями алюминия и хрома [9, 10]. Если в данную композицию ввести огнеупорные порошки (кислые огнеупорные оксиды и их смеси, наполнители алюмосиликатного, глиноземистого и хромосодержащего составов), то формируется ячеистый жаростойкий материал со средней плотностью 400–1000 кг/м³ и температурой применения до 1400–1600 °С [10, 11].

Известны работы [12, 13], в которых описано получение ячеистых жаростойких фосфатных бетонов. В качестве наполнителей использовали тонкомолотый шамот, отработанный алюмохромовый катализатор, алюмосиликатные микросферы, отходы муллитокремнеземистого волокна, в качестве газообразующих компонентов — алюминиевые порошки (до 20 %) и АХФС. После реакции формируется ячеистый

жаростойкий материал со средней плотностью 400–1000 кг/м³, пределом прочности при сжатии 1,4–3,5 МПа и температурой применения до 1400–1600 °С.

Разработка пористых теплоизоляционных огнеупорных материалов с применением вторичных ресурсов и отходов промышленности представляет актуальную задачу, поскольку не только позволяет расширить сырьевую базу и снизить себестоимость теплоизоляционных огнеупоров при сохранении высоких показателей свойств, но и решает проблему утилизации отходов. Огнеупорные изделия на фосфатных связках обладают достаточно высокими исходными физико-механическими характеристиками без применения высокотемпературного обжига, что является весьма актуальным при современном уровне энергодефицита.

МЕТОДОЛОГИЯ РАБОТЫ

Для получения пористых теплоизоляционных материалов в данной работе использовали следующие компоненты: шамот (бой огнеупорных изделий марки ША), муллитсодержащие отходы, электрокорунд нормальный F-90, алюминиевую пудру марки ПАП-2 (ГОСТ 5494), шлак плавки алюминия, огнеупорную глину веселовского месторождения марки Веско-Гранитик (ТУ У 14.2-00282049-003–2007), ортофосфорную кислоту (ГОСТ 6552). Шлак плавки алюминия (ШПА) Минского моторного завода образуется в результате переработки алюминия. Шлак состоит из смеси металлического алюминия, хлоридов натрия и калия, оксидов алюминия, кремния, железа, а также продуктов взаимодействия металла и флюса с атмосферой и футеровкой плавильной печи и содержит также частицы разрушившегося огнеупора.

Используемый ШПА представлял собой порошок серого цвета. Химический анализ шлака плавки алюминия показал присутствие в нем следующих элементов, %: Al 35,0–43,5, O 40,0–46,2, Si 4,0–5,0, Mg 2,3–2,5, Na 0,9–2,0, K 0,3–0,8, Ca 0,6–0,7, Fe 0,7–1,9, Cl 0,9–1,5, N 5,0–10,5, что в целом при пересчете на чистые оксиды соответствует следующему составу, %: Al_2O_3 70,2–80,8, SiO_2 10,0–12,0, MgO 5,0–6,0, CaO 0,8–1,0, Na_2O 0,6–2,5, K_2O 0,2–0,6, FeO 0,8–2,4. С помощью рентгенофазового анализа (РФА) установлено, что в шлаке присутствует металлический алюминий (~12 %), кремний, Al_2O_3 , шпинель MgAl_2O_4 , AlN , мервинит $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ и NaCl в малых количествах. Оксид алюминия, присутствующий в шлаке в форме γ -фазы с кубической кристаллической решеткой, при 800–1000 °С превращается в корунд (α -фазу) с гексагональной решеткой. Муллитсодержащие отходы — бой форм для отливки алюминиевых сплавов, состоящий по данным РФА из муллита, Al_2O_3 и примеси SiO_2 ; при этом отмеча-

ется присутствие аморфной фазы ввиду наличия гало на дифрактограмме. Структура материала представлена волокнистыми образованиями фазы муллита, сцементированными аморфной составляющей. Синтез АФС проводили согласно методике [14] при использовании в качестве основных компонентов ортофосфорной кислоты и гидроксида алюминия; массовое соотношение P_2O_5 / Al_2O_3 3,8–4,0.

Сырьевую смесь готовили сухим смешением исходных компонентов в шаровой мельнице в течение 15 мин с использованием мелющих тел из алюмосиликатной керамики. Для изготовления пористых материалов методом химического порообразования шихту и твердый газообразующий компонент (алюминий, шлак) в сухом виде перемешивали до получения однородной массы, которую затем затворяли растворами связующего (фосфатной связки). Опытные образцы изготавливали набивкой полученной влажной массы в разъемные формы. По завершении процесса вспучивания и отверждения образцов их сушили при 100–120 °С до полного удаления влаги, а затем термообработывали в электропечи при 800–1300 °С в течение 1 ч.

Кажущуюся плотность, водопоглощение, открытую, закрытую и общую (истинную) пористость образцов определяли по стандартной методике, ТКЛР измеряли на дилатометрах DIL 402 PC фирмы «Netzsch Gerätebau», Германия, предел прочности при сжатии — на прессе типа ИП 100, теплопроводность — на приборе «LFA 457 MicroFlash» фирмы «Netzsch Gerätebau», Германия. Дифференциально-сканирующую калориметрию и теплоемкость определяли на приборе «DSC 404 F3 Pegasus» фирмы «Netzsch Gerätebau», Германия, РФА проводили на установке ДРОН-3 с ионизационной регистрацией рентгеновских лучей при использовании $Cu K_{\alpha}$ -излучения. Изображения структуры получены с применением оптического микроскопа «Leica DFC 280».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химическое взаимодействие с выделением газообразных продуктов возможно при применении систем, содержащих алюминий, при использовании кислых и щелочных растворов. Поскольку содержание алюминия в шлаке может достигать 12 %, он может использоваться в качестве газообразующего компонента для вспучивания смесей при взаимодействии с кислотными и щелочными компонентами. Ввиду выделения аммиака при взаимодействии нитридов, содержащихся в шлаке, со щелочью применение щелчеобразующих компонентов (водного раствора жидкого стекла) представляется небезопасным. На основании этого в качестве газообразующих компонентов использовали ШПА и фосфорсо-

держивающее связующее (ортофосфорная кислота или АФС). При этом установлено, что при использовании 85 %-ной ортофосфорной кислоты реакция протекает чрезвычайно активно с выбросом массы из форм. Для достижения приемлемых результатов, без выброса массы, кислота должна иметь концентрацию 8–12 %, что негативно сказывается на прочности изделий после сушки, поскольку доля синтезированного связующего (фосфатов алюминия) мала.

Для исследований в качестве огнеупорного наполнителя был проведен синтез с применением молотого шамота (серия Ш) фракции 0–0,25 мм, муллитсодержащих отходов (серия М) фракции 0–0,25 мм (бой форм для отливки алюминиевых сплавов) и электрокорунда (серия К) фракции 0,125–0,200 мм. Как показали исследования, предел прочности при сжатии образцов после извлечения из формы после сушки составляет 0,1–0,3 МПа при использовании в качестве наполнителя шамота и электрокорунда и 0,3–0,5 МПа при использовании муллитсодержащих отходов, что связано с их волокнистой структурой и армированием структуры полученных образцов. Графические зависимости свойств от содержания компонентов в смеси показаны на рис. 1. Зависимость прочности материалов, полученных при использовании электрокорунда, на рис. 1 отсутствует в связи с низкими значениями $\sigma_{сж}$ (<1,0 МПа), что связано с недостаточной для спекания температурой обжига. Кроме того, плотность электрокорунда превышает плотность шамота и муллитсодержащего компонента, поэтому наблюдается увеличение $\rho_{каж}$ получаемых образцов пористого материала при использовании электрокорунда в качестве наполнителя.

Как следует из рис. 1, при увеличении содержания алюминия $\rho_{каж}$ получаемого материала снижается, что объясняется увеличением количества выделяющейся газовой фазы при реакции алюминия и кислой фосфатной связки. При росте количества алюминия в смеси до 5 % $\sigma_{сж}$ материала увеличивается, несмотря на снижение $\rho_{каж}$, что связано с повышением доли образующегося фосфата алюминия, который связывает частицы наполнителя. При дальнейшем увеличении количества алюминия $\sigma_{сж}$ материалов снижается, что объясняется повышением пористости материала ($\rho_{каж}$ снижается).

Введение в состав шлака приводит к снижению $\rho_{каж}$ образцов, однако при содержании шлака более 10 % $\rho_{каж}$ резко возрастает, что связано с образованием большого количества жидкой фазы при обжиге и активным спеканием (усадка образцов при содержании шлака 20 % >20 %). При этом введение шлака в состав смеси мало влияет на $\sigma_{сж}$ при использовании муллитсодержащего наполнителя, за исключением составов, содержащих 20 % шлака. При использовании

шамота, в составе которого имеется большее количество примесных оксидов, которые могут образовывать с компонентами шлака легкоплавкие эвтектики, зависимость усложняется. Наблюдаются незначительное снижение $\sigma_{сж}$ при увеличении количества вводимого шлака до 10 %, а затем резкое возрастание более чем в 2 раза, что связано с ростом количества жидкой фазы при обжиге.

Увеличение содержания глины не приводит к значительному изменению плотности и прочности получаемых материалов, однако отмечается некоторое снижение плотности, что можно связать с повышением подвижности частиц получаемой массы на этапе затворения ее связующим. Таким образом, оптимальное сум-

марное содержание алюминия и шлака в смеси для получения пористых материалов составляет 10–20 %.

Для повышения прочности материалов исследовали влияние температуры обжига и различных добавок на процесс синтеза и свойства полученных материалов. Для исследований были выбраны добавки соединений, которые могут взаимодействовать с компонентами основной смеси или связующего: магнезит, хромомagneзит и дигидрофосфат аммония $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Магнезит и хромомagneзит могут взаимодействовать с кислотными остатками в фосфатном связующем с образованием фосфатов магния и алюмохромфосфатов, что позволит повысить прочность изделий при низкотемпературном обжиге (1100–1200 °С). Использование дигидрофосфата аммония, который в водном растворе образует кислую среду, позволит повысить пористость изделий при снижении расхода АФС. Добавки вводили в количестве 5 % в состав серии III. Полученные пористые заготовки обжигали при 1100–1300 °С с шагом 100 °С. Графические зависимости $\rho_{\text{каж}}$ и $\sigma_{\text{сж}}$ полученных материалов от вида добавки и температуры обжига показаны на рис. 2.

Как следует из рис. 2, при введении магнезита и хромомagneзита происходит увеличение $\rho_{\text{каж}}$ и $\sigma_{\text{сж}}$ получаемых материалов, что указывает на протекание процесса образования магний- и алюмохромфосфатных соединений, которые при обжиге повышают прочность материала. Значительное увеличение $\rho_{\text{каж}}$ (на 15–20 %) при введе-

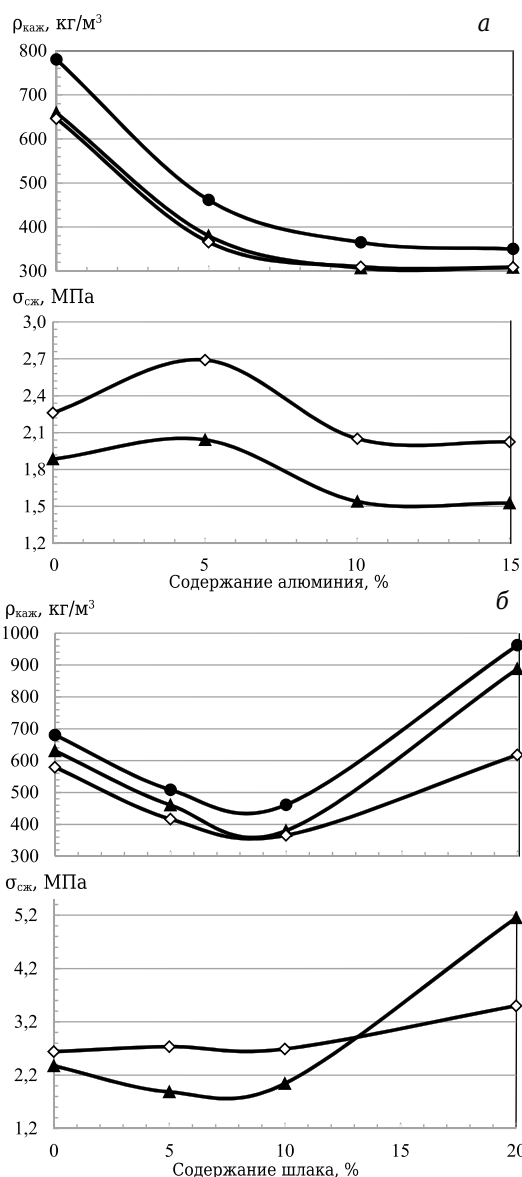


Рис. 1. Зависимости кажущейся плотности $\rho_{\text{каж}}$ и предела прочности при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ материалов от вида огнеупорного наполнителя при изменении содержания в сырьевой смеси алюминия (а) и шлака (б): ▲ — шамот; ◇ — муллитсодержащие отходы; ● — электрокорунд

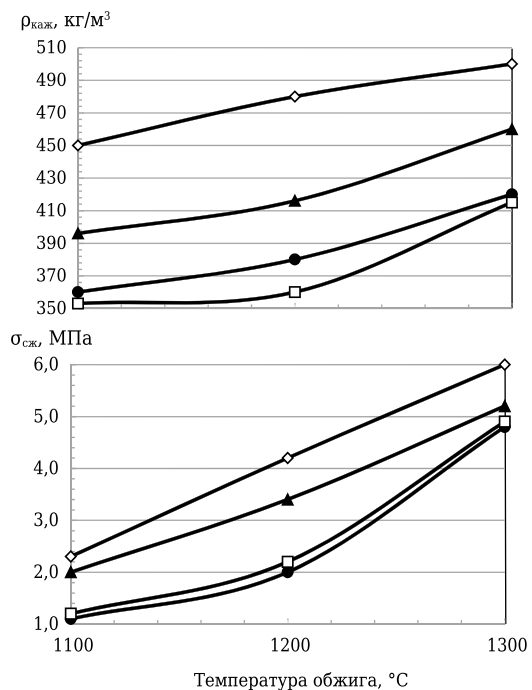


Рис. 2. Зависимости $\rho_{\text{каж}}$ и $\sigma_{\text{сж}}$ полученных материалов от температуры обжига и вида добавки: ● — без добавки; ▲ — магнезит; ◇ — хромомagneзит; □ — дигидрофосфат аммония

нии хромомagnesита также связано с его большой плотностью, а поскольку он не полностью вступает во взаимодействие с кислотными остатками фосфатного связующего, то также выступает в роли огнеупорного наполнителя, и чем выше плотность наполнителя, тем больше она у полученного материала. Введение дигидрофосфата аммония, как и ожидалось, ввиду кислотного характера при взаимодействии и разложении при обжиге снижает $\rho_{\text{каж}}$ получаемых материалов, однако $\sigma_{\text{сж}}$ при этом незначительно повышается. Это связано с образованием связующих фосфатных соединений в большем количестве.

Таким образом, установлено, что введение добавок позволяет направленно изменять характеристики материалов в зависимости от требований к плотности и прочности. При повышении температуры обжига увеличиваются плотность материала и в большей степени его предел прочности при сжатии. Показано, что при повышении температуры обжига от 1100 до 1300 °C плотность получаемых материалов увеличивается на 10–15 %, а прочность в 2–4 раза. Оптимальным температурным диапазоном обжига является 1200–1300 °C.

Температурные зависимости теплоемкости и теплопроводности материалов, полученных при использовании шамотного и муллитсодержащего огнеупорного наполнителя при температуре обжига 1200 °C, показаны на рис. 3. Теплопроводность λ материала, полученного с применением муллитсодержащего наполнителя, ниже, чем у материала, полученного с применением шамота. Это связано как с изменением плотности материалов (при использовании муллитсодержащего наполнителя она меньше), так и со структурой самого наполнителя, которая представляет собой агломераты волокнистых частиц, что увеличивает пористость и снижает теплопроводность. Резкое увеличение теплопроводности выше 600 °C связано с увеличением доли радиационной составляющей переноса тепла и снижением точности измерения теплопроводности.

Установлены уравнения регрессии, соответствующие экспериментальным данным: для материала, полученного с применением шамотного наполнителя, $\lambda = 0,1240 - 6,82 \cdot 10^{-5} \cdot t + 5,56 \cdot 10^{-7} \cdot t^2$, для материала, полученного с использованием муллитсодержащего наполнителя, $\lambda = 0,0876 + 4,20 \cdot 10^{-5} \cdot t + 3,88 \cdot 10^{-7} \cdot t^2$, где t — температура, °C. Сравнение полученной зависимости теплопроводности от температуры для пористого материала на основе шамотного наполнителя и промышленно выпускаемого легковесного огнеупора ШЛ-0,4 (для которого $\lambda = 0,12 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot t$) показывает, что полученный материал имеет сравнимые показатели, при этом технология его производства упрощается и снижается температура обжига.

Данные РФА полученных материалов в зависимости от состава показаны на рис. 4. Установ-

лено, что фазовый состав материалов, получаемых при использовании шамотного наполнителя и муллитсодержащих отходов, представлен фазами муллита и фосфатами алюминия различной кристаллической структуры (берлинит, кристобалитовый и тридимитовый типы) с общей формулой AlPO_4 . Структура материалов характеризуется присутствием спеченной кристаллической фазы и большим количеством неизомерических пор размерами до 6–8 мм. При этом образцы на основе шамотного наполнителя

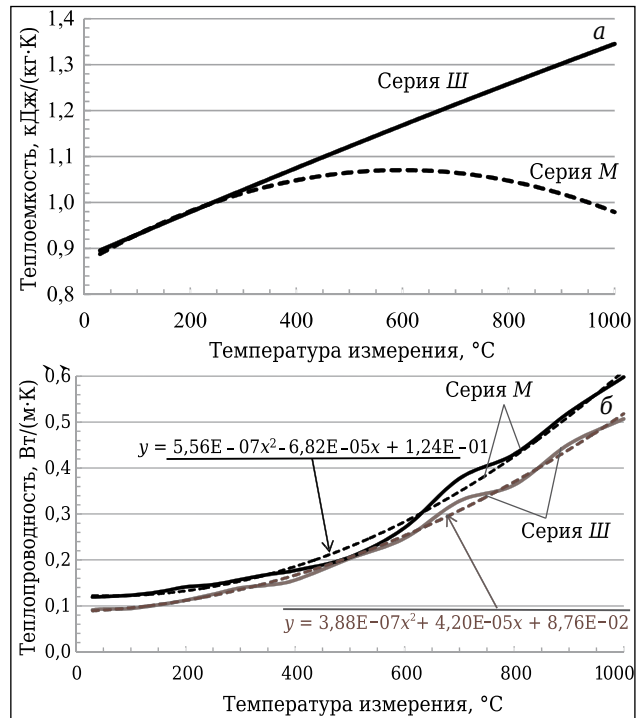


Рис. 3. Зависимости теплоемкости (а) и теплопроводности (б) материалов от температуры измерения и состава

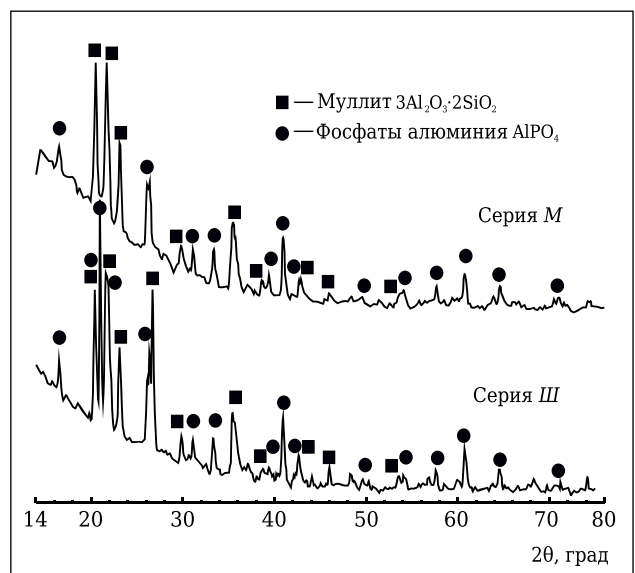


Рис. 4. Рентгенограмма полученных материалов серий М и Ш

характеризуются меньшим размером пор, что связано с относительно высокой плотностью наполнителя и хорошим смачиванием раствором фосфатного связующего. Это приводит к оседанию и слипанию частиц в процессе вспучивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования пористых материалов, полученных в ходе химических и экзотермических реакций, на основе системы, содержащей огнеупорный наполнитель (шамот, муллитсодержащие отходы и электрокорунд), алюминий, веселовскую глину, шлак плавки алюминия и АФС. Показано, что оптимальное суммарное содержание алюминия и шлака в смеси для получения пористых материалов составляет 10–20 %. Установлено, что введение добавок магнезита и хромомагнезита, а также дигидрофосфата аммония

позволяет регулировать плотность и прочность получаемых материалов. Показано, что при повышении температуры обжига от 1100 до 1300 °С плотность получаемых материалов увеличивается на 10–15 %, а прочность в 2–4 раза.

Установлены температурные зависимости теплоемкости и теплопроводности получаемых материалов в диапазоне 30–1000 °С. Материалы имеют следующие характеристики: кажущаяся плотность 300–780 кг/м³, предел прочности при сжатии 1,5–5,2 МПа, огнеупорность выше 1500 °С. Фазовый состав материалов, получаемых при использовании шамотного наполнителя и муллитсодержащих отходов, представлен фазами муллита и фосфатами алюминия различной кристаллической структуры с общей формулой $AlPO_4$. Структура материалов представлена спеченной кристаллической фазой и большим количеством неизометрических пор размерами до 6–8 мм.

Библиографический список

1. Семченко, Г. Д. Неформованные огнеупоры / Г. Д. Семченко. — Харьков : НТУ ХПИ, 2007. — 304 с.
2. Семченко, Г. Д. Вогнетривкі виробі для футерування теплових технологічних агрегатів : навч. посіб. / Г. Д. Семченко. — Харків : НТУХПІ, 2009. — 176 с.
3. Абызов, В. А. Жаростойкий газобетон на основе алюмомагнийфосфатного связующего и высокоглиноземистых промышленных отходов : дис... канд. техн. наук: 05.23.05 / В. А. Абызов. — Челябинск, 2000. — 21 с.
4. Кащеев, И. Д. Химическая технология огнеупоров : уч. пособие / И. Д. Кащеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. — М. : Интермет Инжиниринг, 2007. — 752 с.
5. Копейкин, В. А. Материалы на основе металлофосфатов / В. А. Копейкин, А. П. Перова, И. Л. Рашкован. — М. : Химия, 1976. — 200 с.
6. Хлыстов, А. И. Физико-химические основы определения составов жаростойких бетонов / А. И. Хлыстов // Строительные материалы. — 1998. — № 8. — С. 8, 9.
7. Шаяхметов, У. Ш. Фосфатные композиционные материалы и опыт их применения / У. Ш. Шаяхметов. — Уфа : Старая Уфа, 2001. — 150 с.
8. Абызов, А. Н. Получение теплоизоляционных жаростойких фосфатных материалов методом самораспространяющегося синтеза / А. Н. Абызов // Жаростой-

кие материалы и бетоны : сб. науч. тр. — Челябинск : УралНИИСтромпроект, 1978. — С. 50–53.

9. Абызов, А. Н. Получение поризованных жаростойких фосфатных материалов методом самораспространяющегося экзотермического синтеза : тез. докл. Всесоюз. совещ. «Высокотемпературная химия силикатов и оксидов» / А. Н. Абызов. — Л. : Наука, 1988. — С. 399–401.

10. Пак, Ч. Г. Разработка и исследование жаростойкого алюмохромфосфатного газобетона : дис. ... канд. техн. наук / Ч. Г. Пак. — М., 1987. — 21 с.

11. Абызов, В. А. Ячеистые жаростойкие материалы на основе промышленных отходов / В. А. Абызов // Строительство и образование : сб. науч. тр. Вып. 4. — Екатеринбург : УГТУ, 2001. — С. 123, 124.

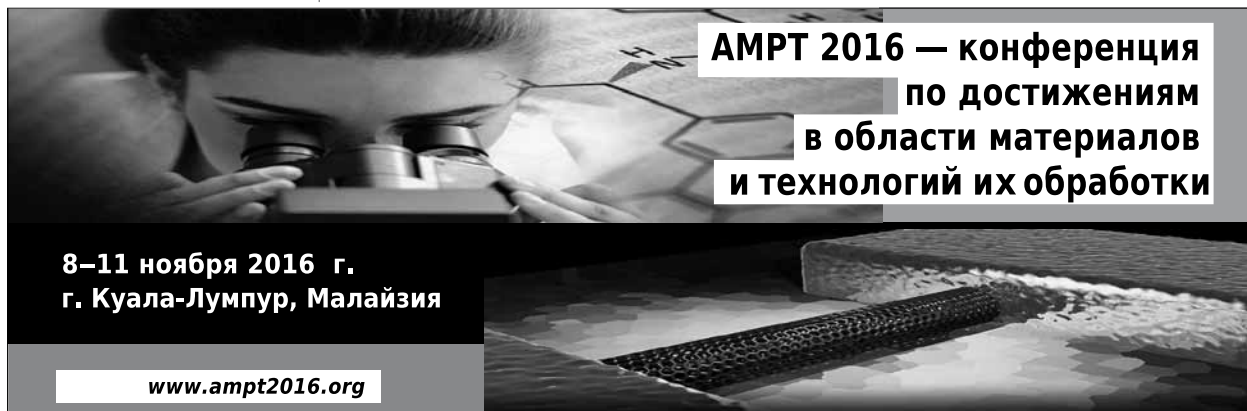
12. Пак, Ч. Г. Жаростойкие фосфатные ячеистые материалы переменной плотности / Ч. Г. Пак, В. А. Абызов, В. М. Багтрашов // Вестник ЮУрГУ. — 2010. — № 15. — С. 4, 5.

13. Абызов, В. А. Жаростойкий фосфатный газобетон с добавками отходов огнеупорного волокна / В. А. Абызов, О. А. Клинов // Вестник ЮУрГУ. — 2011. — № 35. — С. 38, 39.

14. Сычев, М. М. Неорганические клеи / М. М. Сычев. — Л. : Химия, 1986. — 152 с. ■

Получено 26.04.16
© К. Б. Подболотов, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



**АМРТ 2016 — конференция
по достижениям
в области материалов
и технологий их обработки**

**8–11 ноября 2016 г.
г. Куала-Лумпур, Малайзия**

www.ampt2016.org