

УДК 666.1.022.8

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-1-159-168

*О.В. КАЗЬМИНА¹, А.П. СЕМКЕ¹, И.В. БЕЛЯЕВА¹, Б.С. СЕМУХИН²,**¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,**²Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНОЙ РУДЫ

Статья посвящена актуальной экологической проблеме рационального использования природных ресурсов путем вовлечения в производство техногенных отходов. Рассматривается технология получения пористого материала на основе хвостов обогащения медной руды. Цель исследования – оценка пригодности данных отходов для производства теплоизоляционного материала. Химический состав хвостов и его высокая дисперсия указывают на потенциальную пригодность для синтеза фритты без полного плавления шихты. Синтез фритты осуществляется из двухкомпонентной шихты, состоящей на 80 % из отходов и 20 % кальцинированной соды. Температура синтеза не превышает 900 °С, чем выгодно отличается от традиционного стекловарения, протекающего при 1500 °С. Экспериментальным путем установлено, что оптимальную поровую структуру с высокой степенью однородности и средним размером пор не более 1 мм имеют образцы, полученные при температуре вспенивания 850 °С с выдержкой 10 мин. Полученный пористый материал плотностью 250 кг/м³ имеет повышенную прочность (до 1,7 МПа).

Ключевые слова: медные хвосты; низкотемпературный синтез фритты; прочность; пористый материал.

Для цитирования: Казьмина О.В., Семке А.П., Беляева И.В., Семухин Б.С. Получение пористого теплоизоляционного материала из хвостов обогащения медной руды // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 1. С. 159–168.

*O.V. KAZMINA¹, A.P. SEMKE¹, I.V. BELYAEVA¹, B.S. SEMUKHIN²,**¹National Research Tomsk Polytechnic University,**²Tomsk State University of Architecture and Building*

PRODUCTION OF FOAMED HEAT INSULATION MATERIALS FROM COPPER ORE MILL TAILINGS

This paper focuses on ecological and environmental management problems involving the industrial wastes. The paper proposes the production method for foamed materials on made from copper ore tailings. The goal of the study is to evaluate the industrial waste applications in the production of heat-insulating materials. The chemical composition of wastes and its high dispersion indicates to its potential use in the frit synthesis without complete melting of the mixture. Frit is synthesized from a two-component blend consisting of 80 % waste and 20 % caustic ash. The synthesis temperature does not exceed 900 °C which is a better alternative to the conventional glassmaking temperature of 1500 °C. It is shown that the optimum porous, uniform structure with the average pore size is not over 1 mm forms in samples prepared at a foaming temperature of 850 °C followed by a 10-minute curing. The resulting materials has a density of 250 kg/m³ and increased strength up to 1.7 MPa.

Keyword: copper or mill tailing; low-temperature frit synthesis; strength; foamed material.

For citation: Kazmina O.V., Semke A.P., Belyaeva I.V., Semukhin B.S. Poluchenie poristogo teploizolyatsionnogo materiala iz khvostov obogashcheniya mednoi rudy [Production of foamed heat insulation materials from copper ore mill tailings]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 1. Pp. 159–168.

Известно, что в результате добычи и переработки горных пород образуется значительное накопление различных отходов, которые, как правило, складывают в отвалах, хвостохранилищах или шлакоаккумуляторах. Такой подход к решению вопросов утилизации отходов представляет серьезную опасность в экологическом плане, особенно это касается многотоннажных промышленных отходов, таких как металлургические шлаки, ежегодный выход которых в мире составляет сотни миллионов тонн. По некоторым данным, мировая добыча горнорудного сырья и топлива значительно превысила 150 млрд т в год [1–3]. Поэтому задачи переработки техногенного сырья представляют собой одну из важнейших проблем современного мира и являются чрезвычайно актуальными.

Использование техногенного сырья в качестве компонента шихты для производства строительных материалов является одним из основных направлений переработки отходов. В этом плане разработка пористых теплоизоляционных материалов на основе техногенного и некондиционного сырья рассматривается как эффективный метод снижения издержек производства. Получение теплоизоляционных материалов с использованием техногенного сырья – одно из интенсивно развивающихся направлений исследований [4–6]. Особенно актуальны вопросы получения экологически безопасных и долговечных эффективных теплоизоляторов, к которым относятся пеностеклянные материалы. Разработкой технологии и расширения сырьевой базы для их производства занимаются ученые различных стран [7, 8]. В основном эти исследования направлены на использование различных видов стеклобоя, в частности стекла электронно-лучевых трубок, экранов компьютеров и т. п.

Цель работы – исследовать пригодность хвостов обогащения медной руды для получения гранулированного пористого теплоизоляционного материала при температурах, не превышающих 900 °С.

Для этого решались следующие задачи: исследование пригодности хвостов обогащения медной руды в качестве основного компонента шихты для низкотемпературного (при температурах ниже 950 °С) синтеза фритты; разработка состава пенообразующей смеси на основе синтезированной фритты; определение оптимальных параметров температурного режима вспенивания; исследование основных свойств гранулированного пористого материала.

По внешнему виду хвосты обогащения медной руды представляют собой мелкозернистую пробу светло-бежевого цвета. По химическому составу отходы представлены пониженным содержанием основного стеклообразующего оксида SiO_2 и повышенным содержанием Al_2O_3 , Fe_2O_3 , а также оксидов щелочных и щелочноземельных металлов. Согласно результатам рентгенофлуоресцентного анализа отходы не соответствуют марке кварцевого песка ПС-250 (ГОСТ 22551–77), который используют для производства пеностекла, консервной тары и бутылок из полубелого стекла, изоляторов,

труб, аккумуляторных банок (табл. 1). Оксиды, которые входят в состав стекла в качестве основных компонентов, такие как SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , необходимо учитывать при расчете состава шихты. Важным показателем является стабильность химического состава отходов. Установлено, что отклонения по содержанию основных оксидов не превышают 0,2 %, что указывает на их высокую стабильность, обусловленную усреднением состава в процессе переработки. Результаты спектрального анализа пробы отходов показали присутствие следующих элементов, содержание которых не превышает 0,1 масс. %: As – 0,0006 %; Co – 0,0102 %; Ni – 0,0066 %; Mn – 0,098 %. Радиологические измерения, проведенные с помощью радиометра-дозиметра, показали, что радиационная активность не превышает допустимые нормы естественного фона и составляет 0,07 мкзв/ч. Эффективная активность составляет 241 Бк/кг, что также не превышает уровень безопасности для строительных материалов (370 Бк/кг).

Таблица 1

Химический состав отходов и кварцевого песка марки ПС-250

| Сырье | Содержание оксидов, масс. % | | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------|---------------|
| | SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | CaO | MgO | Na_2O | K_2O | Cr_2O_3 | TiO_2 | SO_3 |
| Кварцевый песок (ПС-250) | > 95,00 | < 4,00 | < 0,25 | – | – | – | – | – | – | – |
| Проба 1 | 68,18 | 17,16 | 3,85 | 3,04 | 1,81 | 3,47 | 1,67 | 0,15 | 0,49 | 0,18 |
| Проба 2 | 68,58 | 16,91 | 3,77 | 2,99 | 1,77 | 3,51 | 1,63 | 0,14 | 0,50 | 0,19 |
| Средний состав | 68,38 | 17,04 | 3,81 | 3,02 | 1,79 | 3,49 | 1,65 | 0,14 | 0,50 | 0,18 |

Минералогический состав хвостов обогащения представлен двумя минералами – кварцем и альбитом. По результатам количественного рентгеноструктурного анализа, проведенного при использовании программы Match!, содержание кварца и альбита составляет 60 и 40 % соответственно.

По гранулометрическому составу отход относится к тонкодисперсным материалам. Согласно результатам лазерной дифракции (рис. 1), исследуемый отход на 90 % представлен частицами размером менее 55 мкм, при этом 50 % зерен имеют размер менее 10 мкм. Насыпная плотность исследуемого отхода составляет 807 кг/м³, истинная плотность – 1980 кг/м³.

Выбор химического состава фритты обусловлен следующими требованиями. В составе фритты должно быть достаточное количество стеклообразователя (60–75 масс. %), к которым относится SiO_2 , и относительно высокое количество модификаторов (13–22 масс. %), представленных оксидами щелочных металлов. Количество расплава, образующегося при температуре до 900 °С, должно составлять более 70 %, что установлено по ранее полученным данным [9]. Низкотемпературный синтез фритты осуществляется при температуре не менее 0,8 от температуры ликвидуса, не превышая 900 °С. При таких температурах во фритте сохраняется кристаллическая фаза, количество которой не должно превышать 25 % [10]. Кроме того, количество окисляющего компо-

нента (в виде SO_3), который необходим для протекания реакций вспенивания, должно быть не менее 0,15 %. Важным условием выбора является также низкая кристаллизационная способность стеклофазы, т. к. неуправляемая кристаллизация негативно сказывается на качестве готового материала.

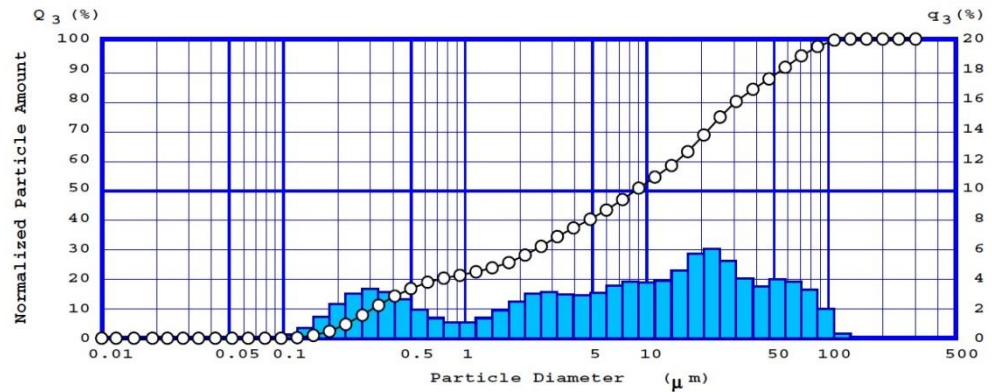


Рис. 1. Гранулометрический состав отходов

Пересчитанный трехкомпонентный состав отхода попадает на диаграмме состояния системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ в область альбита и имеет температуру полного плавления 1050°C . Рассчитанная кривая плавкости отхода показывает, что содержание расплава 70 % достигается при температуре свыше 1000°C , что указывает на необходимость добавления легкоплавкого компонента, в качестве которого выбрана кальцинированная сода с содержанием основного вещества Na_2CO_3 в количестве 99 масс. %. Шихта, отвечающая всем вышеперечисленным требованиям, состоит из отхода (80 %) и кальцинированной соды (20 %) и обеспечивает следующий состав фритты, масс. %: SiO_2 – 60,88; Na_2O – 16,23; Al_2O_3 – 15,21; Fe_2O_3 – 3,40; CaO – 2,69; MgO – 1,59. Фигуративная точка состава также находится в поле альбита и имеет температуру полного плавления 880°C . Кривая плавкости данного состава показывает, что при температуре плавления смеси 730°C содержание расплава составляет 70 %.

Вспенивание силикатного расплава с техническим углеродом проходит при температуре $800-900^\circ\text{C}$. Известно, что для получения пористых материалов типа пеностекла вязкость расплава в интервале температур вспенивания должна находиться в пределах 10^5-10^7 Па·с. Предварительную оценку вязкостных характеристик фритты проводили по модулю вязкости (M_B), значение которого должно находиться в пределах 1,6–1,9. Значение модуля вязкости состава фритты составляет 2,1, что выше оптимального. При этом необходимо учитывать, что вязкость расплава, полученного при плавлении реальной шихты, будет ниже за счет присутствия в отходе примесей, которые не учитываются в формуле

$$M_B = (M_{\text{SiO}_2} + 2M_{\text{Al}_2\text{O}_3}) / (2M_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + M_{\text{CaO}} + M_{\text{MgO}} + 2M_{\text{K}_2\text{O}} + 2M_{\text{Na}_2\text{O}}),$$

где M_{SiO_2} , $M_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, $M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$, M_{CaO} , M_{MgO} , $M_{\text{K}_2\text{O}}$, $M_{\text{Na}_2\text{O}}$ – количество оксидов кремния, алюминия, железа, кальция, магния, калия, натрия соответственно, масс. %.

Для рассчитанного состава фритты при использовании программы SciGlass Professional на диаграмме $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ построены линии температур, соответствующие вязкости расплава 10^6 Па·с, согласно которым установлено, что состав фритты обеспечивает необходимую вязкость в интервале температур вспенивания 800–900 °С.

Таким образом, теоретические расчеты показывают, что состав модельной шихты обеспечивает необходимое количество расплава (более 70 %) при температуре до 900 °С и отвечает требованиям вязкости расплава, значение которой находится в пределах 10^5 – 10^7 Па·с при температурах вспенивания 800–900 °С. Поэтому далее исследования проводили на составе шихты, состоящей на 80 % из хвостов обогащения и 20 % из кальцинированной соды. В качестве газообразователя использован технический углерод с удельной поверхностью $16000 \text{ м}^2/\text{кг}$ и насыпной плотностью $320 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Технология получения пористого теплоизоляционного материала состоит из двух основных этапов, которые отражены в ранее полученных результатах [11]. Вначале путем термообработки исходной шихты на основе отхода синтезируется низкотемпературная фритта. Далее фритта измельчается с добавлением газообразователя, смесь гранулируется и вспенивается до готового продукта. Технология позволяет поэтапно оптимизировать структуру и свойства готового материала. Для этого на первом этапе решается задача синтеза фритты с заданными характеристиками, управлять которыми можно за счет рецептурных и технологических факторов. На втором этапе осуществляется управление основными показателями макроструктуры материала.

Результаты дифференциального термического анализа (ДТА) (рис. 2) показали, что нагрев шихты выбранного состава до 1000 °С сопровождается эндоэффектами, которые отвечают за удаление гигроскопической воды (100 °С), плавление эвтектик и двойных солей (768 и 877 °С). Эндотермический эффект незначительной интенсивности при 575 °С соответствует полиморфному превращению кварца. Основные потери массы приходятся на температурный интервал 500–750 °С, что соответствует реакциям силикатообразования. При достижении температуры 800 °С термогравиметрическая кривая выходит на горизонталь, что указывает на полное связывание Na_2CO_3 и завершение реакций силикатообразования. При температуре 768 °С появляется расплав, что способствует ускорению процесса образования силикатов.

Таким образом, термообработка исследуемой шихты при температуре до 900 °С обеспечит полное завершение процессов силикатообразования, что является необходимым условием для стеклообразования. Для подтверждения проведен количественный рентгенофазовый анализ фритты, полученной при температуре 800, 850, 900 °С. По результатам экспериментально полученных данных установлено, что на всех рентгенограммах наблюдается аморфное гало, указывающее на присутствие стеклофазы, а также максимумы отражения, отвечающие за кристаллическую фазу (рис. 3), представленную остаточным кварцем ($d = 3,342 \text{ нм}$; $2\Theta = 26,7^\circ$) и альбитом ($d = 3,18 \text{ нм}$; $2\Theta = 28,0^\circ$). Увеличение температуры обработки шихты с 800 до 900 °С приводит к увеличению количества стеклофазы с 75 до 85 %. По результатам количественного рентгенофазового анализа установлено различное содержание стеклофазы

в зависимости от температуры синтеза фритты и времени выдержки. С увеличением температуры синтеза с 800 до 1000 °С при изотермической выдержке от 5 до 15 мин количество стеклофазы увеличивается с 75 % (800 °С, 10 мин) до 83 % (1000 °С, 10 мин).

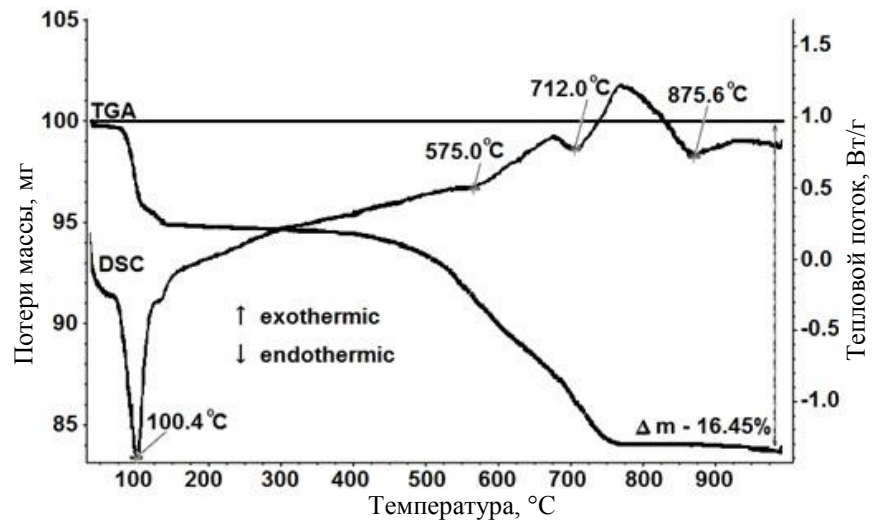


Рис. 2. TG, DTG кривые двухкомпонентной шихты с соотношением компонентов: отход – 80 масс. % и кальцинированная сода – 20 масс. %

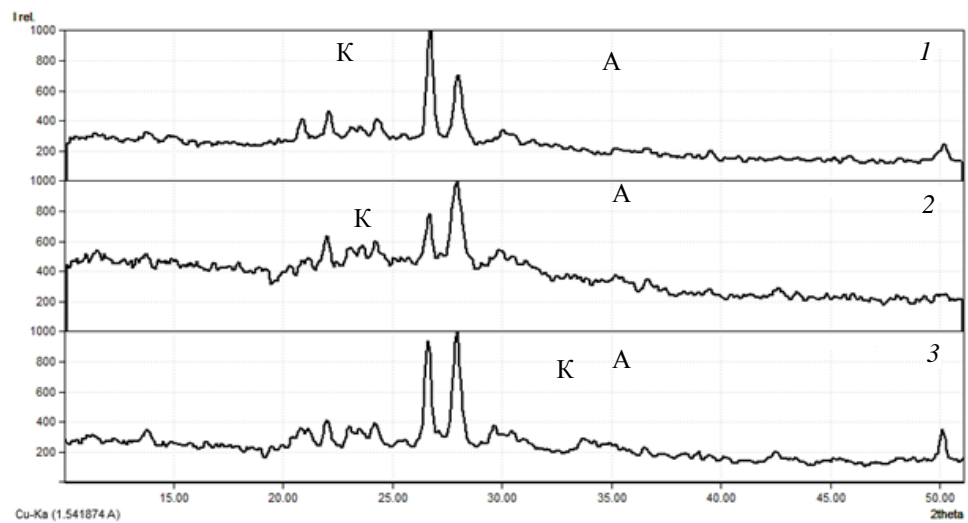


Рис. 3. Рентгенограмма фритты, полученной при температуре: 1 – 900 °С; 2 – 850 °С; 3 – 800 °С (К – кварц; А – альбит)

Пенообразующая смесь готовилась из измельченной фритты (удельная поверхность 5000 см²/г) путем перемешивания с техническим углеродом в количестве 0,5 масс. %. Гранулирование проводили на тарельчатом грануляторе с ис-

пользованием в качестве связки 15% раствора жидкого стекла. Полученные гранулы высушивались на воздухе и вспенивались при температуре 800–900 °С. Установлено, что из фритты, синтезированной при 800 °С, несмотря на достаточное количество стеклофазы, не получается качественный пористый материал. Расплав данного состава обладает повышенной вязкостью, что обусловлено значительным количеством кристаллической фазы (25 %). Вспенивание при температуре 800 °С приводит к появлению пористой структуры только в поверхностном слое, внутри гранулы материал выглядит монолитным. Фритта, синтезированная при 850 °С, также не обеспечивает получение равномерной пористой структуры. Поэтому дальнейшие исследования проводились на фритте, синтезированной при температуре 900 °С. На термограмме данной фритты не наблюдается явно выраженных экзотермических эффектов, что указывает на отсутствие процессов кристаллизации. Эндотермический эффект при 674 °С соответствует плавлению фритты. Потери массы, связанные с выделением остаточного CO_2 , не превышают 2 %, что говорит о достаточно полном протекании процессов силикатообразования на первой стадии синтеза фритты.

Количество кристаллической фазы в пористом материале зависит от режима вспенивания. В зависимости от температуры вспенивания (от 850 до 900 °С) и выдержки при данной температуре (от 5 до 15 мин) содержание кристаллической фазы уменьшается до 10 % (900 °С, 10 мин) (рис. 4).

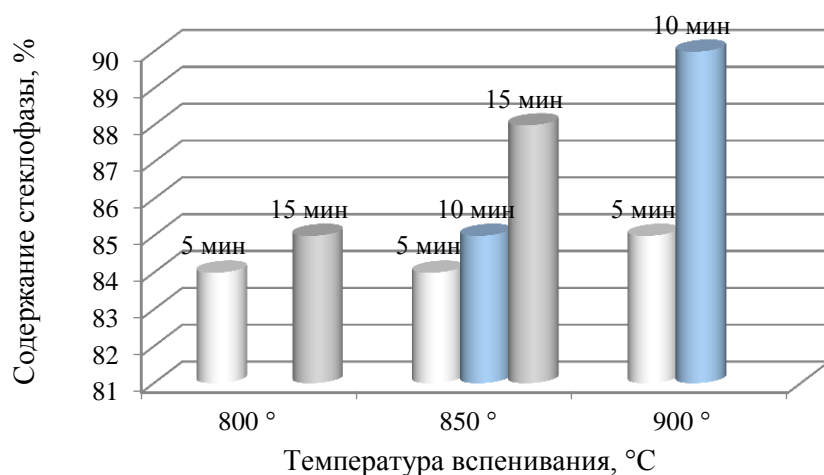


Рис. 4. Количество стеклофазы в образцах, полученных при различной температуре вспенивания с изотермической выдержкой 5, 10 и 15 мин

При различном температурном режиме вспенивания получено три типа макроструктур, отличающихся по среднему размеру пор и степени неоднородности. Оптимальной поровой структурой является тип с высокой степенью однородности ($C_n < 10\%$) и со средним размером пор не более 1 мм. Образцы с такой макроструктурой имеют наибольшую прочность при относительно низкой плотности. Установлено, что высокую степень однородности имеют образцы, полученные при температуре вспенивания 850 °С с выдержкой 10 и 15 мин. Образцы,

полученные при температуре 800 и 900 °С, имеют неравномерную структуру с присутствием мелких и крупных пор соответственно. На рис. 5 представлена макроструктура образцов, синтезированных с различной изотермической продолжительностью вспенивания при 850 °С. Оптимальным режимом является температура вспенивания 850 °С с выдержкой 10 мин.

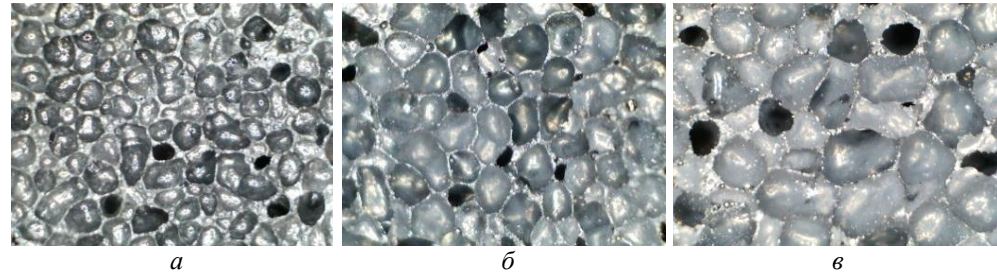


Рис. 5. Макроструктура образцов, полученных при температуре вспенивания 850 °С с выдержкой (×20):
а – 5 мин; б – 10 мин; в – 15 мин

От режима вспенивания также зависят физико-механические свойства готовых образцов, полученных на основе низкотемпературной фритты (табл. 2).

Таблица 2

Основные свойства материала, полученного из фритты, синтезированной при 900 °С

| Режим вспенивания | | Предел прочности на сжатие, МПа | Плотность, кг/м ³ | | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | Водопоглощение, % |
|-------------------|---------------|---------------------------------|------------------------------|----------|--|-------------------|
| Температура, °С | Выдержка, мин | | Средняя | Насыпная | | |
| 800 | 10 | 6,6 | 650 | 398 | 0,123 | 0,2 |
| 800 | 15 | 4,5 | 500 | 294 | 0,091 | 0,2 |
| 850 | 5 | 3,5 | 380 | 224 | 0,087 | 0,7 |
| 850 | 10 | 3,0 | 350 | 206 | 0,085 | 0,8 |
| 850 | 15 | 2,8 | 330 | 194 | 0,083 | 0,9 |
| 900 | 5 | 2,2 | 299 | 176 | 0,080 | 0,9 |
| 900 | 10 | 1,7 | 250 | 147 | 0,070 | 0,9 |

При температуре вспенивания 800 °С гранулированный материал соответствует тяжелому керамзиту, в отличие от которого полученный пористый материал имеет низкое водопоглощение (менее 1 %). При температуре вспенивания 900 °С материал соответствует легкому керамзиту (менее 400 кг/м³), но при этом имеет неравномерную пористую структуру, что снижает прочность. Сравнительная характеристика образцов, полученных при 850 °С, указывает на то, что наиболее прочным является материал, полученный при выдержке 10 мин. В данном случае материал имеет большую, чем у традицион-

ного пеностекла, прочность, и его можно рекомендовать для использования в качестве конструкционно-теплоизоляционного. Установлено, что при плотности от 250 до 400 кг/м³ материал более прочный, чем керамзит, и имеет меньшее водопоглощение. При относительно низкой плотности (до 250 кг/м³) материал превосходит по прочности пеностекло.

В результате проведенных исследований установлена возможность утилизации хвостов обогащения медной руды и расширения сырьевой базы для получения материалов теплоизоляционного назначения. Полученный материал обладает водопоглощением менее 1 %, что указывает на способность сохранять свои теплотехнические характеристики во времени, и имеет неограниченный срок службы. Гранулированный материал удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к эффективным пористым заполнителям, и имеет расширенную область применения.

Материал с плотностью до 300 кг/см³ рекомендуется в качестве теплоизоляционного для промышленного и строительного сектора. При плотности выше 300 кг/см³ и прочности от 2,5 МПа назначение материала теплоизоляционно-конструкционное. Технология получения пористого материала из отходов обогащения медной руды по способу низкотемпературного синтеза фритты является ресурсосберегающим и энергоэффективным решением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Abd Rashid R.Z., Mohd Salleh H., Ani M.H., Yunus N.A., Akiyama T., Purwanto H.* Reduction of low grade iron ore pellet using palm kernel shell // *Renew Energy*. 2014. 63. P. 617–623.
2. *Adiansyah J.S., Rosano M., Vink S., Keir G.* A framework for a sustainable approach to mine tailings management: Disposal strategies // *J. Clean. Prod.* 2015. 108. P. 1050–1062.
3. *Ali M.M., Agarwal S.K., Pahuja A.* Potentials of copper slag utilisation in the manufacture of ordinary Portland cement // *Adv. Cem. Res.* 2013. 25. P. 208–216.
4. *Liao Y.C., Huang C.Y.* Effects of CaO addition on lightweight aggregates produced from water reservoir sediment // *Constr. Build. Mater.* 2011. 25. P. 2997–3002.
5. *Mueller A., Schnell A., Ruebner K.* The manufacture of lightweight aggregates from recycled masonry rubble. *Constr. Build. Mater.* 2015. 98. P. 376–387.
6. *Volland S., Brötz J.* Lightweight aggregates produced from sand sludge and zeolitic rocks // *Constr. Build. Mater.* 2015. 85. P. 22–29.
7. *Makowski C., Finkl C.W., Rusenko K.* Suitability of Recycled Glass Cullet as Artificial Dune Fill along Coastal Environments // *J. Coastal Res.* 2013. 29 (4). P. 772–782.
8. *Chul-Tae Lee.* Production of alumino-borosilicate foamed glass body from waste LCD glass // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2013. V. 19. P. 1916–1925.
9. *Казьмина О.В., Верещагин В.И.* Физико-химическое моделирование состава пеностекло-кристаллических материалов // *Физика и химия стекла*. 2015. Т. 41. № 1. С. 166–172.
10. *Kazmina O.V., Semukhin B.S., Elistratova A.W.* Strengthening of foam glass materials // *Adv. Mat. Res.* 2013. 872. P. 79–83.
11. *Казьмина О.В., Верещагин В.И., Семухин Б.С., Абияка А.Н.* Низкотемпературный синтез стеклогранулята из шихт на основе кремнеземсодержащих компонентов для получения пеноматериалов // *Стекло и керамика*. 2009. № 10. С. 5–8.

REFERENCES

1. *Abd Rashid R.Z., Mohd Salleh H., Ani M.H., Yunus N.A., Akiyama T., Purwanto H.* Reduction of low grade iron ore pellet using palm kernel shell. *Renew Energy*. 2014. V. 63, Pp. 617–623.

2. Adiansyah J.S., Rosano M., Vink S., Keir G. A framework for a sustainable approach to mine tailings management: Disposal strategies. *Journal of Cleaner Production*. 2015. V. 108, Pp. 1050–1062.
3. Ali M.M., Agarwal S.K., Pahuja A. Potentials of copper slag utilisation in the manufacture of ordinary Portland cement. *Advances in Cement Research*. 2013. V. 25. Pp. 208–216.
4. Liao Y.C., Huang C.Y. Effects of CaO addition on lightweight aggregates produced from water reservoir sediment. *Construction and Building Materials*. 2011. V. 25. Pp. 2997–3002.
5. Mueller A., Schnell A., Ruebner K. The manufacture of lightweight aggregates from recycled masonry rubble. *Construction and Building Materials*. 2015. V. 98. Pp. 376–387.
6. Volland S., Brötz J. Lightweight aggregates produced from sand sludge and zeolitic rocks. *Construction and Building Materials*. 2015. V. 85. Pp. 22–29.
7. Makowski C., Finkl C.W., Rusenko K. Suitability of Recycled Glass Cullet as Artificial Dune Fill along Coastal Environments. *Journal of Coastal Research*. 2013. V. 29. No. 4. Pp. 772–782.
8. Chul-Tae Lee. Production of alumino-borosilicate foamed glass body from waste LCD glass. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2013. V. 19. Pp. 1916–1925.
9. Kazmina O.V., Vereshchagin V.I. Fiziko-khimicheskoe modelirovanie sostava penosteklokristallicheskih materialov [Physicochemical modeling of composition of foam glass-crystal materials]. *Fizika i khimiya stekla*. 2015. V. 41. No. 1. Pp. 122–126. (rus)
10. Kazmina O.V., Semukhin B.S., Elistratova A.W. Strengthening of foam glass materials. *Advances in Cement Research*. 2013. V. 872. Pp. 79–83.
11. Kazmina O.V., Vereshchagin V.I., Semukhin B.S., Abiyaka A.N. Nizkotemperaturnyi sintez steklogranulyata iz shikht na osnove kremnezemsoderzhashchikh komponentov dlya polucheniya penomaterialov [Low-temperature synthesis of granular glass from mixes based on silica-alumina-containing components for obtaining foam materials]. *Steklo i keramika*. 2009. V. 66. Pp. 341–344. (rus)

Сведения об авторах

Казьмина Ольга Викторовна, докт. техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 630050, г. Томск, пр. Ленина, 30, kazmina@tpu.ru

Семке Анна Павловна, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 630050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Беляева Ирина Владимировна, магистрант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 630050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Семухин Борис Семенович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, bsemukhin@mail.ru

Authors Details

Olga V. Kazmina, DSc, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave, 634028, Tomsk, Russia, kazmina@tpu.ru

Anna P. Semke, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave, 634028, Tomsk, Russia.

Irina V. Belyaeva, Graduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave, 634028, Tomsk, Russia.

Boris S. Semukhin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, semoukhin@yahoo.com