

УДК 666.616; 552.11

**С. Е. Баранцева¹, Ю. А. Климош¹, Л. И. Хмылко¹, А. И. Позняк²,
Н. Н. Гундилович¹, И. М. Азаренко¹, А. В. Поспелов¹**

¹Белорусский государственный технологический университет

²Институт Пприме CNRS, Университет Пуатье (Франция)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГРАНИТОИДНЫХ ПОРОД БЕЛАРУСИ

В статье приведены результаты исследования процессов порообразования и формирования структуры теплоизоляционных материалов, основным компонентом сырьевых композиций которых являются гранитоидные породы Микашевичского месторождения Республики Беларусь. В результате многопозиционной термической обработки определены температурные интервалы, соответствующие изменениям агрегатного состояния гранитоидной породы при нагревании, являющиеся основными критериями выбора температурных параметров обжига. Установлено, что синергетический эффект химических и физических процессов, происходящих при термической обработке, как наиболее важной и ответственной технологической стадии получения материала, обеспечивает интенсивное порообразование, что способствует получению материала с комплексом высоких показателей эксплуатационных свойств, стабильными значениями объемной и насыпной плотности, а также коэффициента теплопроводности. Для оценки физико-химических процессов, которые происходят при высокотемпературной обработке сырьевой композиции на основе гранитоидных пород, анализа возможности протекания реакций и установления оптимальных температурных параметров режима обжига проведен термодинамический анализ. Показано, что реакционная активность составляющих оксидов резко отличается друг от друга, вследствие чего каждый тип взаимодействия между ними начинается в определенном температурном интервале. Разработаны научные основы управления процессами порообразования и формирования структуры пористого теплоизоляционного материала, удовлетворяющего требованиям нормативно-технической документации, предъявляемым к материалам аналогичного назначения.

Ключевые слова: теплоизоляционный материал, гранитоиды, порообразование, структура, термодинамический анализ, реакционная активность, параметры обжига.

**S. E. Barantseva¹, Yu. A. Klimosh¹, L. I. Khmylko¹, A. I. Poznyak²,
N. N. Gundilovich¹, I. M. Azarenko¹, A. V. Pospelov¹**

¹Belarusian State Technological University

²Institute Pprime CNRS, Universite De Poitiers (France)

RESEARCH OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES OF THE FORMATION OF A POROUS STRUCTURE OF HEAT-INSULATING MATERIALS BASED ON GRANITOID ROCKS OF BELARUS

The article presents the results of the study of pore and structure formation of heat-insulating materials, the main component of the raw materials of which are granitoid rocks of the Mikashevichi deposit of the Republic of Belarus. As a result of the multi-position heat treatment, temperature ranges are determined that correspond to changes in the state of aggregation of granitoid rock upon heating, which are the main criteria for choosing the temperature parameters of firing. It has been established that the synergistic effect of chemical and physical processes that occur during heat treatment, as the most important and critical technological stage of material production, provides intensive pore formation, which helps to produce materials with a complex of high performance properties, stable values of apparent and bulk density, as well as the coefficient thermal conductivity. To evaluate the physical and chemical processes that occur during high-temperature processing of raw material composition based on granitoid rocks, to analyze the possibility of reactions and establish the optimal temperature parameters of the firing regime, a thermodynamic analysis was carried out. It was shown that the reaction activity of the constituent oxides is sharply different from each other, as a result of which each type of interaction between them starts in a certain temperature range. The scientific basis for managing the processes of pore and structure formation of porous heat-insulating materials that corresponds to the requirements of normative and technical documentation for materials of a similar purpose has been developed.

Key words: heat-insulating material, granitoids, pore formation, structure, thermodynamic analysis, reaction activity, firing parameters.

Введение. Изучение возможности практического использования магматических пород, в частности гранитоидов кристаллического фундамента юга Беларуси, для получения востребованных пористых теплоизоляционных материалов строительного назначения в настоящее время является актуальным и перспективным направлением не только в плане расширения минерально-сырьевой базы республики, но и решения вопросов улучшения экологической ситуации на горно-перерабатывающих предприятиях за счет использования техногенных отходов дробления при производстве дорожного щебня. Актуальность исследований подтверждена непрерывно возрастающим объемом промышленного и гражданского строительства, что требует увеличения выпуска строительных материалов, важным элементом которых являются легкие бетоны и, соответственно, пористые заполнители.

Микашевичское месторождение строительного камня, являющееся частью кристаллического фундамента юга Беларуси, разрабатывается карьерным способом РУПП «Гранит», который представляет собой многофункциональный технологический комплекс. Разрабатываемые горные породы представлены в основном гранитами, диоритами и гранодиоритами, объединенными общим названием «гранитоиды». Благодаря значительному усреднению при неоднократном промежуточном дроблении существенным преимуществом гранитоидных отсеков являются относительно небольшие колебания их химического состава. В настоящее время в составе 21 млн т переработанных за год пород около 25% (5,2 млн т) приходится на техногенные отходы, в частности на некондиционную фракцию – отсеки и циклонную пыль.

Основная часть. По химико-минеральному составу, как первому и главному признаку пригодности сырья, гранитоиды являются перспективной сырьевой основой для получения пористых теплоизоляционных силикатных материалов. Усредненный химический оксидный состав гранитоидных пород, согласно [1], представлен, мас. %: 60,85 SiO₂; 1,58 TiO₂; 15,40 Al₂O₃; 7,84 Fe₂O₃; 4,55 CaO; 2,85 MgO; 2,55 Na₂O; 4,41 K₂O, ппп 2,87. Основными минералами являются плагиоклазы, кварц, полевой шпат, роговая обманка, микроклин, амфибол; вторичными – эпидот, серицит, хлорит; аксессуарными – сфен, апатит, магнетит, пирит.

Изменение агрегатного состояния гранитоидных пород имеет решающее значение для установления оптимальных температурно-временных параметров обжига, которые обеспечивают процесс вспучивания и формирования

пористой структуры материала, непосредственно связанный с переходом системы в пиропластическое состояние с образованием жидкой фазы.

В результате многопозиционной термической обработки условно выделены 2 стадии изменения агрегатного состояния гранитоидной породы при нагревании:

– начало спекания за счет появления жидкой фазы при $1160 \pm 5^\circ\text{C}$;

– интервал плавления пробы до расплава, составляющий $1170\text{--}1300^\circ\text{C}$.

Данные дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) породы, полученные при нагревании в интервале температур $20\text{--}1300^\circ\text{C}$ со скоростью подъема температуры $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ (рис. 1), коррелируют с результатами многопозиционной термообработки. На кривой ДСК в области температур $500\text{--}550^\circ\text{C}$ наблюдается экзоэффект, соответствующий фазовому переходу метастабильной формы $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (маггемита) в стабильную $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_4$ (гематит). При 573°C отмечается слабовыраженный эндоэффект, обусловленный фазовым переходом кварца из β -формы в α -форму. Эндоэффект в интервале $1160\text{--}1240^\circ\text{C}$ обусловлен изменением пиропластического состояния за счет образования жидкой фазы при нагревании, поэтому этот интервал температуры является основным критерием выбора температурных параметров обжига.

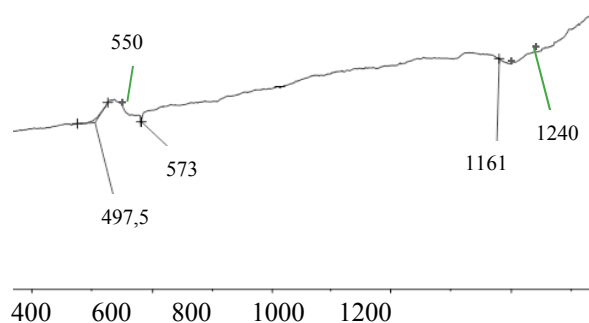


Рис. 1. Кривая ДСК гранитоидных отсеков

Экспериментальная сырьевая композиция состояла из основного компонента – гранитоидных отсеков и дополнялась пластифицирующим компонентом (глина месторождения «Лукомль»), порообразующей добавкой (карбид кремния – SiC) и связующими (карбоксиметилцеллюлоза, вода).

Число пластичности является основным критерияльным фактором, обуславливающим формовочные характеристики керамических масс, способных создавать тестообразную текстуру, которые под действием внешних сил способны изменять форму без разрыва сплошности

(образования трещин) и сохранять ее после снятия нагрузки.

В результате корректировки содержания глины в сырьевых композициях (табл. 1) установлено оптимальное массовое соотношение «гранитоидная порода/глина», составляющее 69,5/30. Число пластичности при этом равно 10,5; керамическая масса относится к умеренно пластичной, что позволило обеспечить процесс получения сырцовых гранул в условиях, близких к производственным в грануляторах барабанного типа.

Таблица 1

Число пластичности экспериментальных керамических масс

Индекс состава	Содержание глины, мас. ч	Число пластичности
Г – 1	10	3,77
Г – 2	20	5,06
Г – 3	30	10,5
Г – 4	40	10,94
Г – 5	50	12,05
Г – 6	60	14,88

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (рис. 2) изучены процессы, происходящие при термической обработке сырьевых композиций на основе гранитоидных отсевов, глинистого компонента, КМЦ и карбида кремния.

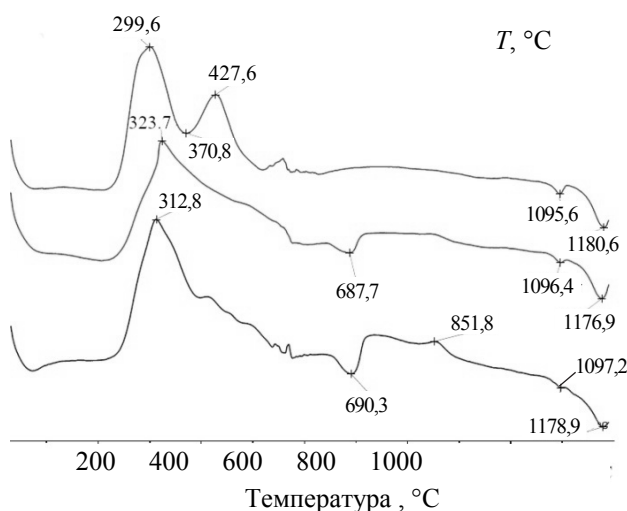


Рис. 2. Кривые ДСК сырьевых композиций серии Г

Согласно кривым ДСК для сырьевых композиций серии Г, в области температур 300–430°C наблюдается ярко выраженный экзотермический эффект, обусловленный выгоранием органической составляющей. Затем происходит разложение глинистых минералов, что соответствует эндоэффекту при 680–690°C, интенсивность

которого увеличивается с ростом глинистой составляющей в составе композиции (табл. 1). Плавление смеси сырьевых компонентов происходит при температуре $1180 \pm 10^\circ\text{C}$.

Технологические стадии получения материала включали подготовку сырьевой композиции → формование сырцовых гранул → сушку гранул (100°C) → обжиг в интервале $1160\text{--}1190^\circ\text{C}$ (вспучивание и формирование пористой структуры) → охлаждение → рассев на фракции.

Процесс обжига (термической обработки) является наиболее ответственным при получении пористых керамических материалов. Основными температурно-временными параметрами обжига являются температура сушки, температура промежуточной стадии – подогрева для удаления остатков гигроскопической влаги и конечная температура обжига, скорость подъема температуры по стадиям и время выдержки на каждой из них. Проведенные экспериментальные исследования позволили рекомендовать режим термической обработки образцов материала, включающий следующие температурно-временные экспозиции: подъем температуры до 100°C за 10 мин, выдержка 10 мин; подъем температуры до 600°C за 30 мин, выдержка 10 мин; подъем температуры до 1190°C за 30 мин, выдержка 10 мин; охлаждение инерционное, как наиболее приемлемый и обеспечивающий коэффициент вспучивания образцов 2,1–3,2.

На основании анализа показателей свойств образцов, полученных по вышеуказанному режиму термообработки (табл. 2), установлено, что оптимальным является состав сырьевой композиции Г-3, содержащий 30 мас. ч. глины.

Он наиболее приемлем с точки зрения использования максимального количества магматической горной породы, обеспечения необходимых формовочных свойств и связанности частиц керамической массы, а также объемной и насыпной плотности, соответствующих требованиям нормативно-технической документации.

Для оценки физико-химических процессов, которые происходят при высокотемпературной обработке сырьевой композиции на основе гранитоидных пород (состав Г-3), проведен термодинамический анализ. Так как в состав сырьевой композиции входят оксиды различной природы: кислотные (SiO_2 , P_2O_5 , TiO_2), амфотерные (Al_2O_3 , Fe_2O_3) и основные (CaO , MgO , FeO , K_2O , Na_2O) (табл. 3), при высокотемпературной обработке эти соединения вступают в химическое взаимодействие друг с другом, образуя солевые композиции. Следует отметить, что реакционные активности приведенных оксидов резко отличаются друг от друга и, вследствие чего, каждый тип взаимодействия между ними начинается в определенном температурном интервале.

Таблица 2

Свойства образцов экспериментальных составов

Свойства	Содержание глинистого компонента, мас. ч.					
	10	20	30	40	50	60
Объемная плотность, кг/м ³	517	527	689	739	826	770
Насыпная плотность, кг/м ³	316	323	423	453	507	472
Коэффициент вспучивания	3,58	3,24	2,66	2,34	2,20	2,13
Водопоглощение, %	15,22	13,76	12,58	10,35	7,07	6,05

Таблица 3

Термодинамические характеристики оксидов, входящих в состав сырьевых композиций

Термодинамические характеристики	Оксиды, входящие в состав сырьевой композиции										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
$\Delta H_{f,298}^{\circ}$, кДж/моль	-908	-1676	-635	-602	-264	822	-363	-416	-943	-2980	-385
S_{298}° , Дж/моль·К	42,7	50,9	39,7	26,9	60,8	88	94	75	50,3	228	61,5
$\Delta G_{f,298}^{\circ}$, кДж/моль	-854	-1582	-604	-570	-244	-740	-322	-377	-889	-2680	-363

С целью анализа возможности протекания реакций и установления оптимальных температурных режимов обжига в табл. 3 приведены справочные данные термодинамических характеристик вышеперечисленных оксидов [2] – стандартной энтальпии образования $\Delta H_{f,298}^{\circ}$, стандартной энтропии S_{298}° , стандартной свободной энергии Гиббса $\Delta G_{f,298}^{\circ}$.

Из представленных данных видно, что легкоплавкие оксиды (FeO, K₂O, Na₂O) имеют более положительные значения энтальпии образования $\Delta H_{f,298}^{\circ}$ и свободной энергии Гиббса $\Delta G_{f,298}^{\circ}$. Поэтому по мере повышения температуры при обжиге керамических масс именно они первыми начинают вступать в реакции с органическим примесями и кислотными оксидами (SiO₂, P₂O₅, TiO₂). Наиболее отрицательные значения $\Delta H_{f,298}^{\circ}$ и $\Delta G_{f,298}^{\circ}$ характерны для оксидов Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, что свидетельствует об их низкой реакционной способности и необходимости высоких температур для химических процессов с их участием.

В ходе высокотемпературной обработки по мере повышения температуры можно выделить следующие основные реакции:

- 1) $2K_2O + 2Na_2O + 2SiO_2 \rightarrow K_4SiO_4 + Na_4SiO_4$;
- 2) $2CaO + 2MgO + 2SiO_2 \rightarrow Ca_2SiO_4 + Mg_2SiO_4$;
- 3) $2CaO + 2MgO + 2P_2O_5 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + Mg_3(PO_4)_2$;
- 4) $6FeO + O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4$;
- 5) $4Fe_3O_4 + O_2 \rightarrow 6Fe_2O_3$;
- 6) $2Fe_2O_3 + 3SiO_2 \rightarrow Fe_4(SiO_4)_3$;
- 7) $2Al_2O_3 + 3SiO_2 \rightarrow Al_4(SiO_4)_3$;
- 8) $CaO + Al_2O_3 \rightarrow Ca(AlO_2)_2$;
- 9) $3K_2O + 3Na_2O + 2Al_2O_3 \rightarrow 2K_3AlO_3 + 2Na_3AlO_3$;
- 10) $FeO + SiO_2 \rightarrow FeSiO_3$.

Анализ приведенных реакций показал, что при получении керамических масс при высоких

температурах образуются полимерные алюмосиликатные и ряд других композиций на основе имеющихся оксидных форм. Следует отметить, что для каждой реакции имеется свой температурный интервал протекания, что доказывается расчетными данными на основании термодинамических характеристик (табл. 3).

В качестве примера нами рассмотрена термодинамическая возможность протекания реакции получения метасиликата Fe(II) ($FeO_{(к)} + SiO_{2(к)} \rightarrow FeSiO_{3(к)}$). Стандартные энтальпии образования $\Delta H_{f,298}^{\circ}$ для FeO_(к), SiO_{2(к)}, FeSiO_{3(к)} равны соответственно -264; -908; -1195,8 кДж/моль. Соответствующие значения стандартных энтропий S_{298}° для исходных оксидов и метасиликата Fe(III) составляют 60,8; 42,7; 93,9 Дж/моль·К. Расчет теплового эффекта данной реакции по закону Гесса приводит к следующим значениям: $\Delta H_{298}^{\circ} = 240,0$ кДж; $\Delta S_{298}^{\circ} = -9,6$ Дж/К. Реакция получения метасиликата Fe(II) является эндотермической и должна протекать с упорядочением кристаллической решетки. Однако оценка значений энергии Гиббса, составляющая $\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ}$; $\Delta G^{\circ} = 240\,200 + T \cdot 9,6$, свидетельствует о ее невозможности ни при каких температурах, и поэтому данное соединение не образуется даже при нагревании. Процесс термодинамически разрешен, если значение $\Delta G < 0$ при определенных температурах. Поскольку значение $T(K)$ всегда положительно, то данное неравенство в случае получения FeSiO₃ невыполнимо.

Расчеты, аналогичные приведенным, показывают, что уже при температурах 100–300°C оксиды железа(II) переходят в оксиды железа(III) и в результате их взаимодействия с другими оксидами образуются соединения железа(III) (Fe₂O₃; Fe₄(SiO₄)₃; Fe₂(SiO₃)₃ и др.),

которые являются устойчивыми при высоких температурах и имеют полимерную структуру.

Энергия Гиббса для силикатов, ортофосфатов, алюмосиликатов имеет отрицательное значение в интервале $(-1200) - (-1800)$ кДж/моль, что свидетельствует об устойчивости полученных соединений.

Имеющиеся в литературе данные о разложении FeO и получении O₂ как источника газовой выделения и образования пор при получении керамзита по схеме $6\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2$ [3] не подтверждаются расчетными данными. Тепловой эффект этой реакции составляет $\Delta H_{298}^\circ = 464$ кДж, изменение энтропии в ходе реакции $S^\circ = 265$ Дж/К. Для протекания реакции величина энергии Гиббса ΔG должна быть меньше нуля в данном температурном интервале. Решение неравенства $(\Delta H - T\Delta S^\circ) < 0$ ($464\,000 - T \cdot 265$) < 0 показывает, что такое условие выполняется лишь при температурах выше 1500°C.

При температурах 1100–1200°C, вероятнее всего, происходят процессы химического взаимодействия оксидов с разрыхлением структуры спекаемых композиций вследствие образования различных полимерных солевых форм. Разрыхляющим компонентом обязательно является вода, которая специально вводится в сырьевую композицию.

Карбид кремния (SiC) является малоустойчивым соединением, и процесс окисления начинается уже при температуре 100–120°C по схеме $\text{SiC} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{CO}_2$. Реакция экзотермическая, идет с выделением большого количества тепла, $\Delta H^\circ = -232$ кДж/моль. Однако основным процессом порообразования является гидролиз SiC в паровоздушной смеси ($\text{SiC} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{CH}_4$), который, как показывает термодинамический анализ, начинается при высоких температурах и заметно проявляется в интервале температур 1100–1250°C. Таким образом, основным порообразователем при термообработке сырьевых гранул состава Г-3 является CH₄, который даже в небольшом количестве значительно развивает удельную поверхность и увеличивает объем пор в структуре керамической массы. Экспериментально установлено, что количество карбида кремния, составляющее 0,5%, является оптимальным и обеспечивает необходимый процесс порообразования и вспучивания материала.

Микроструктура образцов состава Г-3 исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-5610 LV. На рис. 3 приведено электронно-микроскопическое изображение поверхности обожженной гранулы (а) и внутренней поверхности ее поры (б) при кратности увеличения 1000 и 5000.

Как видно из рис. 3, а, поверхность гранулы частично остеклована (темные участки), присутствуют открытые поры различной формы и размеров. Следует отметить, что микроструктура поверхности гранулы идентична микроструктуре поверхности поры (рис. 3, б). Это свидетельствует о том, что появление жидкой стеклообразной фазы и формирование пористой структуры сопровождается физико-химическими процессами, происходящими с аналогичной активностью и химизмом по всему объему материала.

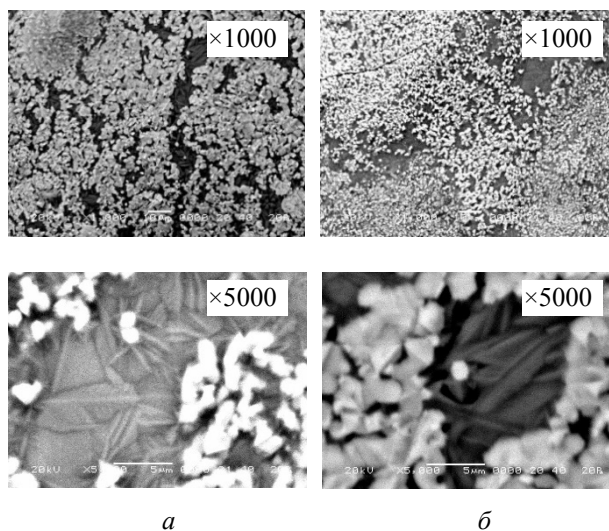


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение поверхности обожженной гранулы (а) и поверхности поры (б)

Для описания механизма спекания гранул с помощью рентгеновского дифрактометра D8 ADVANCE фирмы Bruker (Германия) проведен рентгенофазовый анализ сырьевых материалов и обожженной гранулы оптимального состава. Как видно из рис. 4, минеральный состав глины и гранитоидных отсеков представлен в основном легкоплавкими глинистыми минералами и полевыми шпатами соответственно, с присутствием примесей кварца в обоих случаях. При спекании сырьевой смеси происходит плавление легкоплавких полевых шпатов и аморфизация глинистых минералов, что подтверждается отсутствием их дифракционных максимумов на рентгенограмме гранулы после ее обжига и соответствует химизму процесса высокотемпературного спекания, рассмотренному выше. После спекания в составе материала еще присутствует кварц, однако следует отметить, что интенсивность дифракционных максимумов значительно ниже, чем в исходных компонентах, что объясняется его частичным оплавлением жидкой фазой и входением в ее состав.

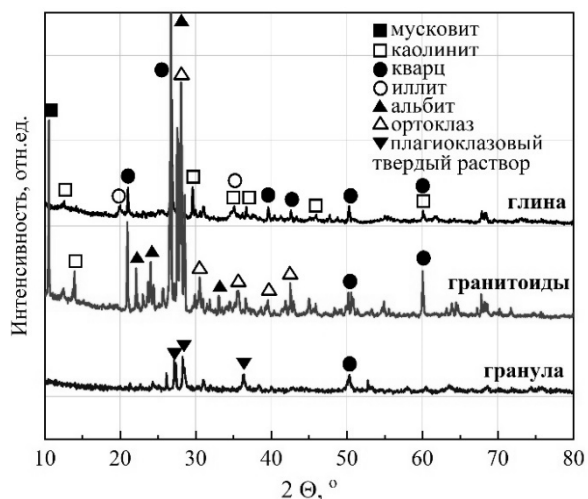


Рис. 4. Рентгенограммы глины, гранитоидов и обожженной гранулы оптимального состава

При высокотемпературной обработке происходит образование новых фаз, которые отвечают по строению твердым растворам плагиоклазовой структуры, но, очевидно, с большей степенью изоморфизма, поскольку дифракционные максимумы смещены относительно максимумов чистой фазы. Вероятно, железо встраивается в состав твердых растворов, что также согласуется с результатами расчетов термодинамической возможности протекания реакций при высокой температуре, которые показали образование полимерных алюмосиликатных композиций на основе имеющихся оксидных форм, в том числе железа, содержание которого достаточно высоко. Присутствие железосодержащих кристаллических фаз незначительно, поэтому они не диагностируются рентгенофазовым анализом. Возможно также присутствие реликтовых минералов из гранитоидной породы, не претерпевающих структурных превращений до температуры обжига, составляющей $1190 \pm 5^\circ\text{C}$.

Кроме того, не исключается наличие кристаллоподобных железосодержащих образова-

ний и в стекловидной составляющей изучаемого образца теплоизоляционного материала (рис. 3 а, б).

Для изготовления лабораторной партии образцов пористого заполнителя сырцовые гранулы, отформованные из керамической массы состава Г-3, были подвергнуты термической обработке по вышеприведенному режиму и получен пористый заполнитель наиболее востребованной фракции 10–16 мм (рис. 5), физико-химические свойства которого приведены в табл. 4.



Рис. 5. Пористый заполнитель фракции 10–16 мм, полученный на основе керамической массы состава Г-3

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что синергетический эффект химических и физических процессов, происходящих при термической обработке, как наиболее важной и ответственной технологической стадии получения материала, обеспечивает интенсивное порообразование, что способствует получению материала с комплексом высоких показателей эксплуатационных свойств и отличается необходимыми и стабильными значениями объемной и насыпной плотности, а также коэффициента теплопроводности.

Таблица 4

Основные свойства пористого заполнителя состава Г-3 фракции 10–16 мм

Свойства	Показатели свойств
Объемная плотность, кг/м ³	650–700
Насыпная плотность, кг/м ³	395–420
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0,075–0,085
Механическая прочность при сжатии, МПа	2,0–2,2
Водопоглощение, %	10,3–13,8
Коэффициент вспучивания	2,1–3,2
Морозостойкость, потери массы после 15 циклов замораживания и оттаивания, %	0,1–0,3
Потеря массы при кипячении, %	1,87–1,89
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	91,41

Научные основы управления процессами порообразования и формирования структуры обеспечивают получение пористого теплоизоляционного материала, удовлетворяющего требованиям нормативно-технической документации.

Важным преимуществом разработанного материала является использование в качестве сырьевой основы гранитоидных пород промышленно разрабатываемого Микашевичского месторождения в виде некондиционной

фракции, образующейся при производстве дорожного щебня на РУПП «Гранит».

Таким образом, выполненные исследования свидетельствуют о том, что по геологоструктурной позиции, вещественному составу и мощности залегания гранитоидные породы являются приемлемым отечественным объектом для получения пористых теплоизоляционных материалов, а их масштабное использование будет способствовать расширению минерально-сырьевой базы республики.

Список литературы

1. Химические анализы горных пород кристаллического фундамента Белоруссии: справочник / А. М. Пап [и др.]. Минск: Наука и техника, 1988. 243 с.
2. Волков А. И., Жарский И. М. Большой химический справочник. Минск: Современная школа, 2005. 607 с.
3. Роговой М. И. Технология искусственных заполнителей и керамики. М.: Стройиздат, 1972. 315 с.

References

1. Pap A. M., Aksamentova N. V., Arkhipova A. A., Naydenkov I. V. *Khimicheskiye analizy gornykh porod kristallicheskogo fundamenta Belorussii* [Chemical analysis of rocks of the crystalline bedrock of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1988. 243 p.
2. Volkov A. I., Zharskiy I. M. *Bol'shoy khimicheskiy spravochnik* [Big chemical reference book]. Minsk, Sovremennaya shkola Publ., 2005. 607 p.
3. Rogovoy M. I. *Tekhnologiya iskusstvennykh zapolniteley i keramiki* [Technology of artificial aggregates and ceramics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972. 315 p.

Информация об авторах

Баранцева Светлана Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры технологии стекла и керамики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: svetbar@tut.by.

Климош Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент, декан факультета «Химическая технология и техника». Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: klim-aspir@mail.ru.

Хмылко Людмила Ивановна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры физической, коллоидной и аналитической химии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: LKhmylko@gmail.com

Позняк Анна Ивановна – кандидат технических наук, научный сотрудник Département de Physique et Mécanique des Matériaux. Institute Pprime CNRS, Université De Poitiers (11, Bd Marie et Pierre Curie – BP 30179, 86962, Poitiers, France). Email: hanna.pazniak@univ-poitiers.fr

Гундилович Николай Николаевич – ассистент кафедры технологии стекла и керамики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kolgund@mail.ru.

Азаренко Ирина Михайловна – стажер младшего научного сотрудника кафедры технологии стекла и керамики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ir_az@mail.ru.

Поспелов Андрей Владимирович – младший научный сотрудник Центра физико-химических методов исследования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Andrei29088@mail.ru

Information about the authors

Barantseva Svetlana Evgenievna – PhD (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, Department of Glass and Ceramics Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). Email: svetbar@tut.by

Klimosh Yuri Alexandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Dean of the Faculty of Chemical Technology and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: klim-aspir@mail.ru

Khmylko Lyudmila Ivanovna – PhD (Chemistry), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Physical, Colloidal and Analytical Chemistry. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: LKhmylko@gmail.com

Poznyak Anna Ivanovna – PhD (Engineering), Researcher, the Département de Physique et Mécanique des Matériaux. Institute Pprime CNRS, Université De Poitiers (11, Bd Marie et Pierre Curie – BP 30179, 86962, Poitiers, France). Email: hanna.pazniak@univ-poitiers.fr

Gundilovich Nikolay Nikolayevich – assistant lectures, the Department of Glass and Ceramics Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kolgund@mail.ru

Azarenko Irina Mikhailovna – trainee of the Junior Researcher, the Department of Glass and Ceramics Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ir_az@mail.ru

Pospelov Andrey Vladimirovich – Junior Researcher, the Center for Physical and Chemical Research Methods. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Andrei29088@mail.ru

Поступила 21.04.2020