

Известия вузов. Строительство. 2022. № 10. С. 23–30.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (10): 23–30.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691:699.86.002.3

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-23-30

ГРАНУЛИРОВАННЫЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ПЕСЧАНИКОВЫХ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД УГЛЕДОБЫЧИ ТУВЫ

Борис Комбуй-оолович Кара-сал^{1, 2}, Буян Оюн-оолович Саая¹,

Айлан Шолбановна Сарыглар¹

¹Тувинский государственный университет, Кызыл, Россия

²Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,
Кызыл, Россия

Аннотация. На основе шихты, состоящей из местной отвальной песчаниковой вскрышной породы угледобычи и кальцинированной соды, а также порообразователя из местного известняка получены пористые гранулы с объемной насыпной массой 284 кг/м³, прочностью при сжатии 1,6–1,8 МПа, теплопроводностью 0,09 Вт/м·°C. При этом пористые гранулы, удовлетворяющие требования ГОСТ 9757–90 «Гравий, щебень и песок. Искусственные пористые» произведены из шихты, содержащей 70 % основного сырья, 25 соды и 5 % карбонатного компонента. Данный материал рассматривается как эффективная местная теплоизоляционная засыпка и пористый заполнитель для изготовления легких бетонов.

Ключевые слова: песчаниковые вскрышные породы, шихта, состав, гранула, термообработка, вспенивание, свойства

Для цитирования: Кара-сал Б.К., Саая Б.О., Сарыглар А.Ш. Гранулированный теплоизоляционный материал на основе песчаниковых вскрышных пород угледобычи Тувы // Известия вузов. Строительство. 2022. № 10. С. 23–30. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-23-30.

Original article

GRANULAR THERMAL INSULATION MATERIAL BASED ON SANDSTONE OVERBURDEN ROCKS OF TUVA COAL MINING

Boris K. Kara-sal^{1, 2}, Buyan O. Saaya¹, Ailan Sh. Sarygalar¹

¹Tuva State University, Kyzyl, Russia

²Tuva Institute of Integrated Development of Natural Resources SB RAS,
Kyzyl, Russia

Abstract. On the basis of a charge consisting of a local dump sandstone overburden of coal mining and soda ash, as well as a poroformer from local limestone, porous granules with a volumetric bulk mass of 284 kg/m³, compressive strength of 1.6–1.8 MPa, thermal conductivity of 0.09 W/m·°C were obtained. At the same time, porous granules

that meet the requirements of GOST 9757–90 “Gravel, crushed stone and sand. Artificial porous materials” are obtained from a charge containing 70 % of the main raw material, 25 % of soda and 5 % of carbonate component. The resulting material is considered as an effective local thermal insulation backfill and as a porous aggregate for the manufacture of lightweight concrete.

Keywords: sandstone overburden, charge, composition, granule, heat treatment, foaming, properties

For citation: Kara-sal B.K., Saaya B.O., Saryglar A.Sh. Granular thermal insulation material based on sandstone overburden rocks of Tuva coal mining. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2022. № 10. С. 23–30. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-23-30.

Введение. В настоящее время в связи с энергосбережением и тепловой защитой зданий разрабатываются новые виды минеральных теплоизоляционных материалов, в том числе в виде гранул, которые характеризуются высокой прочностью, хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами, водостойкостью, негорючестью, биостойкостью и низкой теплопроводностью [1, 2]. По сравнению с другими минеральными теплоизоляционными материалами изделия в виде пористых круглых гранул могут использоваться не только как эффективная теплоизоляционная засыпка, но и в качестве пористого заполнителя для легких бетонов.

Из числа гранулированных теплоизоляционных материалов наиболее востребованными являются пеностеклокристаллические изделия, которые отличаются пониженным водопоглощением, высокой прочностью и морозостойкостью [3–5]. Для получения конкурентоспособных гранулированных пеностеклокристаллических материалов используют природные и техногенные сырьевые материалы с высоким содержанием кремнезема (более 80 %) [6–8]. В то же время для производства пеностеклокристаллических материалов практически не применяют минеральные сырьевые материалы, содержащие менее 80 % оксида кремния.

В качестве сырья для получения гранулированных пеностеклокристаллических материалов возможно использование алюмосиликатных горных пород и отходов техногенного происхождения, содержащих менее 80 % кремнезема, переработка которых позволяет снизить стоимость продукции и утилизировать отходы промышленности.

Целью работы является получение гранулированного теплоизоляционного материала из песчаниковых вскрышных пород угледобычи Тувы. Разработка очень актуальна, так как в регионе отсутствует производство теплоизоляционных материалов и пористого заполнителя для изготовления легких бетонов.

Материалы и методы исследований. В качестве основного сырья в работе использованы песчаниковые вскрышные породы (ПВП) угледобычи Кая-Хемского угольного разреза, применение которых обосновано алюмосиликатной основой химического состава породы. Преобладание кремнеземистого компонента ($\text{SiO}_2 > 65 \%$) способствует получению гранул с пористой структурой, высокой прочностью и стекловидной поверхностью с меньшим водопоглощением.

Песчаниковые вскрышные породы угледобычи в отвалах находятся в виде валунов, щебня и песчаных частиц. Цвет породы светло-серый. Объем-

Таблица 1. Химический состав сырьевых материалов, мас. %

Table 1. Chemical composition of raw materials, wt. %

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	П.п.п.
ПВП	69,40	12,04	0,41	5,24	4,46	3,20	2,75	1,63	0,87
Известняк	0,55	0,14	0,06	0,08	54,82	0,89	0,05	0,04	43,47

ная масса щебенистой фракции (до 40 мм) равна 1660 кг/м³. Водопоглощение кусков 4,5–5,1 %. Механическая прочность породы при сжатии колеблется в пределах 69,4–72,3 МПа.

В качестве плавня для активации спекания и расплавления сырьевой массы при термической обработке принята кальцинированная сода Na₂CO₃, характеристики которой регламентируются ГОСТом 5100–85. Как газообразователь и источник процесса вспенивания пиропластической массы использован местный известняк месторождения Хайыраканское.

Изучение химического состава сырьевых материалов, представленного в табл. 1, показало, что содержание основных оксидов в песчаниковой вскрышной породе характерно для полевошпатовых песков. В песчанике содержание SiO₂ равно 69,40 %, что считается средним для алюмосиликатных пород. Доля оксида алюминия менее 13 %, соответственно порода относится к кислым. Концентрация железистых соединений чуть более 5 % и после обжига гранулы имеют серый цвет в сочетании с полевошпатным минералом. Наличие щелочных оксидов K₂O и Na₂O, влияющих на спекание массы при обжиге незначительное (4,38 %). Потери до 0,87 % при прокаливании песчаников свидетельствуют об отсутствии карбонатов и других паровых газообразующих компонентов при обжиге.

Высокое содержание оксида кальция (54,82 %) в местном хайыраканском известняке характеризует высокую чистоту данной породы и качество газообразующего компонента массы.

Исследование минералогического состава песчаниковой вскрышной породы рентгенофазовым анализом показало, что в ней присутствуют альбит (48–52 %), кварц (36–38 %), железистые соединения (5–6 %). Кроме того, зафиксировано наличие слюды и монтмориллонита в незначительном количестве. Электронно-микроскопическим исследованием выявлены прочие соединения полевошпатовых частиц (альбит) с кремнеземистым составляющим породы. Следует отметить, что от чистых песчаников исследованная порода отличается повышенным содержанием альбита и наличием глинистого минерала.

При выполнении работы использована следующая методика. Щебенистая фракция песчаниковой породы (размер частиц до 70 мм) сначала измельчена в щековой дробилке. Затем полученный материал подвергнут тонкому помолу в шаровой мельнице в течение 4–6 ч. Таким же образом раздроблен и измельчен известняк. При подборе состава шихты содержание основного компонента – песчаниковой породы изменялось от 70 до 90 %; кальцинированной соды – 10–25; газообразователя – 3–5 %. После дозировки сырьевые материалы перемешаны в шаровой мельнице в течение 1 ч для равномерного распределения компонентов в объеме сырьевой смеси.

Из перемешанной шихты путем добавления воды (18 %) получены массы, из которых на лабораторном грануляторе произведены гранулы диаметром до 10 мм, после сушки до постоянной массы они подвергались термической обработке при 900 °С, где происходили быстрый нагрев, спекание, расплавление и вспучивание гранул при разложении частиц известняка.

Полученные пористые круглые гранулы испытывались в соответствии с требованиями ГОСТ 9757–90 «Гравий, щебень и песок. Искусственные пористые». Определение коэффициента теплопроводности гранул проводилось с помощью электронного измерителя теплопроводности ИТП-МГ-4.

Результаты работы и обсуждение. В целях оптимизации состава шихты и условий получения пеностеклокристаллического пористого материала в виде круглых гранул проведено изучение зависимости технических характеристик получаемого материала от дисперсности частиц шихты, содержания модифицирующей добавки и газообразователя, а также от технологических параметров.

При исследовании влияния дисперсности частиц смеси на основной технический процесс – вспенивание пиропластической массы – измельченная проба исходной породы просеяна через сито с размерами ячейки 0,140; 0,080; 0,063 и 0,040 мм. Из полученной массы при составе: песчаниковая порода – 70 %; сода кальцинированная – 25 и известняк – 5 % пластическим способом изготовлены гранулы диаметром 8–10 мм, которые после сушки подвергнуты термообработке при 900 °С. Предварительно установлено, что при 900 °С начинается бурное разложение карбоната кальция с выделением газов, что обеспечивает вспучивание пиропластической массы на основе кремнеземсодержащей породы и плавня.

Как выявлено, после обжига при 900 °С с изотермической выдержкой в течение 10 мин (от времени загрузки до последующего охлаждения) гранулы на основе масс размерами частиц менее 0,140; 0,080; 0,063 и 0,040 мм после вспучивания имели объемную насыпную массу 430; 340; 280 и 260 кг/м³. На основе полученных данных оптимальной считается масса с размером частиц менее 0,063 мм, так как при более тонком измельчении сырья наблюдается агломерация (слипание) частиц, препятствующая равномерному распределению газообразователя в порошке и увеличивается расход энергии на помол.

Изучение структуры гранул из массы с размерами частиц менее 0,063 мм показало присутствие крупных пор диаметром 0,8–1,6 мм, средний размер межпоровой перегородки составляет 60 мкм. В структуре гранул на основе масс с размером частиц менее 0,140 и 0,080 мм зафиксированы поры диаметром 0,2–0,5 мм и расстояние между ними значительно больше (80–120 мкм), чем в случае гранул на основе массы размерами частиц менее 0,063 мм.

Исследование влияния содержания плавней показало, что с увеличением доли флюсующего компонента шихты от 10 до 25 % объемная насыпная масса гранул уменьшается с 562 до 284 кг/м³, а механическая прочность круглых гранул – с 3,4 до 1,6 МПа (табл. 2). Водопоглощение

Таблица 2. Влияние содержания плавня на свойства гранул

Table 2. The effect of the content of the melt on the properties of granules

Содержание плавня, %	Объемная насыпная масса гранул, кг/м ³	Водопоглощение, %	Предел прочности при сжатии, МПа п.п.п.
10	562	26,4	3,2
15	486	21,7	2,7
20	378	17,1	2,1
25	264	14,2	1,6

гранул уменьшается с 26,4 до 14,2 %, что связано с увеличением доли стекловидной фазы. На основании того, что с увеличением доли плавня повышается пористость гранул и уменьшается прочность гранул, содержание активатора спекания массы принято ограничить 25 %. Кроме того, дальнейшее увеличение доли плавня вызывает удорожание стоимости сырьевых материалов.

Изучение влияния содержания газообразователя показало, что наиболее оптимальная доля измельченного известняка равна 5 %. Как видно из табл. 3, при включении 2,5 % карбоната кальция процесс вспенивания пиропластической массы происходит недостаточно, вследствие чего объемная насыпная масса гранул равна 512 кг/м³ соответственно. Повышение доли известняка до 7,5 % уменьшает объемную насыпную массу гранул до 237 кг/м³, а механическая прочность снижается до 1,2 МПа. В структуре гранул преобладают крупные поры, что значительно уменьшает прочность материала. Поэтому оптимальным содержанием карбонатного газообразователя принято 5 %, где объемная насыпная масса гранул 284 кг/м³, а прочность при сжатии 1,6 МПа.

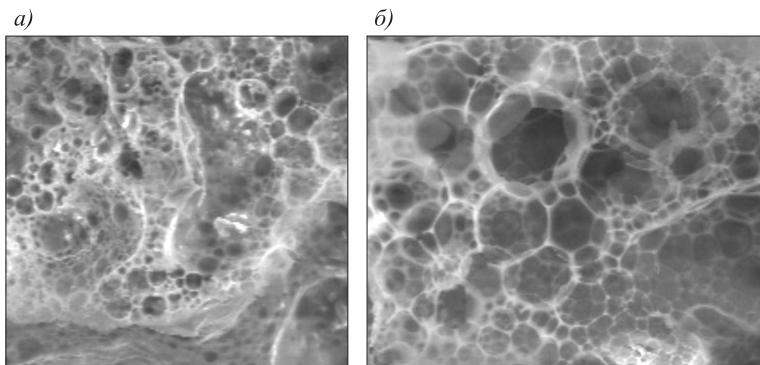
Следует отметить, что важным технологическим параметром, влияющим на качество получаемых гранул, является продолжительность изотермической выдержки при конечной рабочей температуре. Как известно, именно от продолжительности нахождения гранул в зоне обжига зависит протекание процессов плавления и газовыделения [1]. Только при совпадении данных термических процессов образуется необходимая пористая структура гранул [9].

Выявлено, что при продолжительности выдержки гранул в зоне обжига при температуре 900 °C в течение 5 мин объемная насыпная масса изделий составила 446 кг/м³, а при нахождении в течение 10, 15 мин данный пока-

Таблица 3. Изменение свойств гранул в зависимости от содержания газообразователя

Table 3. Changing the properties of granules depending on the content of the gas-forming agent

Содержание плавня, %	Объемная насыпная масса гранул, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа п.п.п.	Теплопроводность, Вт/(м · °C)
2,5	512	3,0	0,13
5	284	1,6	0,09
7,5	237	1,2	0,08



Микроструктура гранул с изотермической выдержкой 5 (а) и 10 мин (б) (увеличение 500 раз)

Microstructure of granules with isothermal exposure of 5 (a) and 10 (b) min (magnification 500 times)

затель равен 284 и 226 кг/м³. Однако изучение микроструктуры образцов показало, что при изотермической выдержке 15 мин в гранулах присутствуют крупные поры с тонкими перегородками.

На рисунке изображена микроструктура гранул, полученных с изотермической выдержкой 10 и 15 мин. Как установлено, в первом случае в структуре материала присутствуют мелкие поры, а во втором – более крупные поры с равномерным распределением.

Исследование фазового состава гранул показало, что материал содержит стекловидную составляющую и кристаллическую фазу – кварц и альбит или представляет пеностеклокристаллический материал. По сравнению с традиционным керамзитовым гравием, применяемым в качестве засыпки, и пористым заполнителем при производстве стеновых панелей пористые гранулы по водопоглощению и прочности превосходят его. Кроме того, температура обжига гранул существенно ниже (900 вместо 1250 °С), что значительно снижает энергозатраты.

Результаты исследований приняты как основа для разработки технологического регламента производства пористого гранулированного теплоизоляционного материала на основе кремнеземсодержащей вскрышной породы угледобычи.

Заключение. На основе кремнеземсодержащей вскрышной породы угледобычи – песчаника и кальцинированной соды с добавкой местного тонкодисперсного известняка получен пористый гранулированный теплоизоляционный материал с объемной насыпной массой 284 кг/м³, прочностью 1,6 МПа и водопоглощением 14,2 %, что позволяет организовать производство местного теплоизоляционного материала, применяемого в качестве засыпного утеплителя и пористого заполнителя при производстве стеновых панелей из легкого бетона.

Ресурсо- и энергосберегающая эффективность разработки заключается в применении отходов угледобычи в отвалах, что исключает специальную разработку месторождения, и в значительном снижении энергетических затрат с уменьшением температуры термообработки на 350 °С.

Список источников

1. *Онацкий С.П.* Производство керамзита. М.: Стройиздат, 1987. 333 с.
2. *Петров В.П., Токарева С.А.* Формирование структуры особо легких пористых заполнителей // Строит. материалы. 2010. № 6. С. 38–43.
3. *Кетов А.А.* Перспективы пеностекла в жилищном строительстве // Строит. материалы. 2016. № 3. С. 79–81.
4. *Казьмина О.В., Верещагин В.И.* Методологические принципы синтеза пеностеклокристаллических материалов по низкотемпературной технологии // Строит. материалы. 2014. № 8. С. 41–45.
5. *Терещенко И.М., Кравчук А.П., Жих Б.Н.* Состояние и перспективы развития производства стекловидных вспененных теплоизоляционных материалов // Стекло и керамика. 2017. № 6. С. 29–32.
6. *Казьмина О.В., Верещагин В.И., Абияка А.Н.* Перспективы использования тонкодисперсных кварцевых песков в производстве пеностеклокристаллических материалов // Стекло и керамика. 2008. № 9. С. 28–30.
7. *Маневич В.Е., Никифоров Е.А., Виницкий А.Л., Субботин Р.К.* Высокоэффективный теплоизоляционный материал на основе диатомитового сырья // Строит. материалы. 2012. № 11. С. 18–20.
8. *Никитин А.И., Стороженко Г.И., Казанцева Л.К., Верещагин В.И.* Теплоизоляционные материалы и изделия на основе трепелов Потанинского месторождения // Строит. материалы. 2014. № 8. С. 34–36.
9. *Верещагин В.И., Соколова С.Н., Мюллер А.* Гранулированные материалы из природного и техногенного сырья // Строит. материалы. 2005. № 5. С. 23–26.

References

1. *Onatskiy S.P.* Production of expanded clay. Moscow: Stroyizdat, 1987. 333 p. (In Russ.).
2. *Petrov V.P., Tokareva S.A.* Formation of the structure of particularly light porous fillers. *Stroitel'nyye materialy = Building materials.* 2010; (6): 38–43. (In Russ.).
3. *Ketov A.A.* Prospects of foam glass in housing construction. *Stroitel'nyye materialy = Building materials.* 2016; (3): 79–81. (In Russ.).
4. *Kazmina O.V., Vereshchagin V.I.* Methodological principles of synthesis of foam-glass-crystalline materials by low-temperature technology. *Stroitel'nyye materialy = Building materials.* 2014; (8): 41–45. (In Russ.).
5. *Tereshchenko I.M., Kravchuk A.P., Zhikh B.N.* State and prospects of development of production of vitreous foamed thermal insulation materials. *Steklo i keramika = Glass and ceramics.* 2017; (6): 29–32. (In Russ.).
6. *Kazmina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N.* Prospects for the use of fine quartz sands in the production of foam-glass-crystalline materials. *Steklo i keramika = Glass and ceramics.* 2008; (9): 28–30. (In Russ.).
7. *Manevich V.E., Nikiforov E.A., Vinitskiy A.L., Subbotin R.K.* Highly effective thermal insulation material based on diatomite raw materials. *Stroitel'nyye materialy = Building materials.* 2012; (11): 18–20. (In Russ.).
8. *Nikitin A.I., Storozhenko G.I., Kazantseva L.K., Vereshchagin V.I.* Thermal insulation materials and products based on trepels of the Potaninsky deposit. *Stroitel'nyye materialy = Building materials.* 2014; (8): 34–36. (In Russ.).
9. *Vereshchagin V.I., Sokolova S.N., Muller A.* Granular materials from natural and man-made raw materials. *Stroitel'nyye materialy = Building materials.* 2005; (5): 23–26. (In Russ.).

Информация об авторах

Б.К. Кара-сал – доктор технических наук, доцент, silikat-tgu@mail.ru

Б.О. Саая – старший преподаватель

А.Ш. Сарыглар – аспирант

Information about the authors

B.K. Kara-sal – DSc, Ass. Professor, silikat-tgu@mail.ru

B.O. Saaya – Senior Lecturer

A.Sh. Saryglar – Post-graduate Student

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.08.2022

The article was submitted 20.08.2022

Одобрена после рецензирования 20.09.2022

Approved after reviewing 20.09.2022

Принята к публикации 27.09.2022

Accepted for publication 27.09.2022
