

А.И. РОДИН¹, А.А. ЕРМАКОВ¹, П.И. АБРАШИН¹, В.Т. ЕРОФЕЕВ¹¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск, Россия

ВЛИЯНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТОВ НА СВОЙСТВА ПОРИСТОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ИЗ КРЕМНИСТЫХ ПОРОД

Аннотация. В статье представлены результаты исследования структуры, физико-механических и теплофизических свойств стеклокерамических материалов. Шихту для изготовления образцов получали из кремнистых пород, каолина, бентонита, Na_2CO_3 и KCl . В планетарной шаровой мельнице проводили совместную механохимическую активацию компонентов. Полученную шихту обжигали в муфельной печи при температуре 850 °С. Экспериментальные результаты получены с применением метода рентгенофазового анализа (РФА). Определены физико-механические и теплофизические свойства образцов. Разработанные материалы (в форме блоков) имеют кажущуюся плотность от 308 до 409 кг/м³, прочность при изгибе до 3,2 МПа и сжатии до 13 МПа, коэффициент теплопроводности от 0,081 до 0,107 Вт/м·°С, предельную температуру эксплуатации до 890 °С включительно. Материалы по многим показателям превосходят пеностекло и стеклокерамику из отходов промышленного производства. Разработанные материалы рекомендуется использовать в качестве теплоизоляции при строительстве объектов промышленного и гражданского назначения.

Ключевые слова: пористая стеклокерамика, кремнистые породы, алюмосиликаты, физико-механические свойства, теплопроводность, предельная температура эксплуатации.

A.I. RODIN¹, A.A. ERMAKOV¹, P.I. ABRASHIN¹, V.T. EROFEEV¹¹National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

INFLUENCE OF ALUMINOSILICATES ON THE PROPERTIES OF POROUS GLASS CERAMICS FROM SILICEOUS ROCKS

Abstract. The article presents the results of the study of the structure, physical-mechanical and thermophysical properties of glass-ceramic materials. The charge mixture for the production of samples was obtained from siliceous rocks, kaolin, bentonite, Na_2CO_3 and KCl . Joint mechanochemical activation of the components was carried out in a planetary ball mill. The charge mixture obtained was fired in a muffle furnace at a temperature of 850 °C. The experimental results were obtained using the method of X-ray phase (XRF) analysis. The physical-mechanical and thermophysical properties of the samples are determined. The developed materials (in the form of blocks) have an apparent density of 308 to 409 kg/m³, flexural strength up to 3.2 MPa and compressive strength up to 13 MPa, thermal conductivity from 0.081 to 0.107 W/m·°C, limiting operating temperature up to 890 °C inclusive. The materials obtained are superior in many respects to foam glass and glass ceramics from industrial waste. They can be used as thermal insulation in the construction of industrial and civil facilities.

Keywords: porous glass ceramics, siliceous rocks, aluminosilicates, physical-mechanical properties, thermal conductivity, limiting operating temperature.

© Родин А.И., Ермаков А.А., Абрашин П.И., Ерофеев В.Т., 2022

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fernandes H.R., Tulyaganov D.U., Ferreira J.M.F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*. 2009. Vol. 35. No. 1. Pp. 229–235. doi:[10.1016/j.ceramint.2007.10.019](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.10.019)

2. Guo H., Ye F., Li W., Song X., Xie G. Preparation and characterization of foamed microporous mullite ceramics based on kyanite. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. No. 10. Pp. 14645–14651. doi:[10.1016/j.ceramint.2015.07.186](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.186)
3. König J., Lopez-Gil A., Cimavilla-Roman P., Rodriguez-Perez M.A., Petersen R.R., Østergaard M.B., Iversen N., Yue Y., Spreitzer M. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 247. 118574. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2020.118574](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118574)
4. Zhu M., Ji R., Li Z., Wang H., Liu L., Zhang Z. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 112. Pp. 398–405. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183)
5. Cao J., Lu J., Jiang L., Wang Z. Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass-ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 8. Pp. 10079–10084. doi:[10.1016/j.ceramint.2016.03.113](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.113)
6. Kyaw Oo D'Amore G., Caniato M., Travan A., Turco G., Marsich L., Ferluga A., Schmid C. Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 165. Pp. 1306–1315. doi:[10.1016/j.jclepro.2017.07.214](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.214)
7. Яценко Е.А., Рябова А.В., Гольцман Б.М. Разработка стеклокомпозиционных покрытий для защиты стальных нефтепроводов от внутренней и внешней коррозии // *Черные металлы*. 2019. №12. С. 46–51.
8. Яценко Е.А., Гольцман Б.М., Косарев А.С., Карандашова Н.С., Смолий В.А., Яценко Л.А. Синтез пеношлакостекла на основе глицериновой порообразующей смеси // *Сборник тезисов международной конференции: «Стекло: наука и практика»*. Санкт-Петербург: ЛЕМА, 2017. С. 214–215.
9. Ji R., Zheng Y., Zou Z., Chen Z., Wei S., Jin X., Zhang M. Utilization of mineral wool waste and waste glass for synthesis of foam glass at low temperature. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 215. Pp. 623–632. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226)
10. Jia R., Deng L., Yun F., Li H., Zhang X., Jia X. Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. *Materials Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 233. Pp. 155–162. doi:[10.1016/j.matchemphys.2019.05.065](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065)
11. Hisham N.A.N., Zaid M.H.M., Aziz S.H.A., Muhammad F.D. Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various temperatures. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 3. 570. doi:[10.3390/ma14030570](https://doi.org/10.3390/ma14030570)
12. Zeng L., Sun H., Peng T., Zheng W. Preparation of porous glass-ceramics from coal fly ash and asbestos tailings by high-temperature pore-forming. *Waste Management*. 2020. Vol. 106. Pp. 184–192. doi:[10.1016/j.wasman.2020.03.008](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.008)
13. Romero A.R., Toniolo N., Voccaccini A.R., Bernardo E. Glass-ceramic foams from 'weak alkali activation' and gel-casting of waste glass/fly ash mixtures. *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 4. 588. doi:[10.3390/ma12040588](https://doi.org/10.3390/ma12040588)
14. Иванов К.С. Методы активации шихты при получении пеностеклокерамики // *Новые огнеупоры*. 2018. №4. С. 107–110. doi:[10.17073/1683-4518-2018-4-107-110](https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-4-107-110)
15. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 16. Pp. 19250–19256. doi:[10.1016/j.ceramint.2016.09.091](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.091)
16. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Klimova L.V., Yatsenko L.A. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 142. No. 1. Pp. 119–127. doi:[10.1007/s10973-020-10015-3](https://doi.org/10.1007/s10973-020-10015-3)
17. Zhimalov A.A., Bondareva L.N., Igitkhanyan Y.G., Ivashchenko Y.G. Use of Amorphous Siliceous Rocks – Opokas to Obtain Foam Glass with Low Foaming Temperature. *Glass and Ceramics*. 2017. Vol. 174. Pp. 13–15. doi:[10.1007/s10717-017-9916-1](https://doi.org/10.1007/s10717-017-9916-1)
18. Kruszewski Ł., Palchik V., Vapnik Y., Nowak K., Banasik K., Galuskina I. Mineralogical, geochemical, and rock mechanic characteristics of zeolite-bearing rocks of the hatrurim basin, Israel. *Minerals*. 2021. Vol. 11. No. 10. 1062. doi:[10.3390/min11101062](https://doi.org/10.3390/min11101062)
19. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Кравчук А.С., Ермаков А.А. Физико-механические и теплофизические свойства пеностеклокерамики на основе кремнеземсодержащей породы // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. №5. С. 8–15. doi:[10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374](https://doi.org/10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374)
20. Родин А.И., Ермаков А.А. Физико-механические свойства пеностеклокерамики на основе кремнистых пород с высоким содержанием CaCO₃ // *Огарев-online*. 2021. №6. Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/fiziko-mexanicheskie-svoystva-penosteklokeramiki-na-osnove-kremnistyx-porod-s-vysokim-soderzhaniem-caco3>
21. Родин А.И., Ермаков А.А. Теплофизические свойства пеностеклокерамики на основе кремнистых пород // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. 2020. №2(11). С. 49–55.

22. Costa F.P.D., Morais C.R.D.S., Pinto H.C., Rodrigues A.M. Microstructure and physico-mechanical properties of Al₂O₃-doped sustainable glass-ceramic foams. *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 256. 123612. doi:[10.1016/j.matchemphys.2020.123612](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123612)
23. Keyvani N., Marghussian V.K., Rezaie H.R., Kord M. Effect of Al₂O₃ content on crystallization behavior, microstructure, and mechanical properties of SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO glass-ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2011. Vol. 8. No. 1. Pp. 203–213. doi:[10.1111/j.1744-7402.2009.02428.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2009.02428.x)
24. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Кравчук А.С., Ермаков А.А. Исследование фазовых превращений в шихте (трепел: Na₂CO₃) для пеностеклокерамики // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 3(40). С.16–23.
25. Милло Ж. Геология глин (выветривание, седиментология, геохимия). Ленинград: Недра, 1968. 369 с.

REFERENCES

1. Fernandes H.R., Tulyaganov D.U., Ferreira J.M.F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*. 2009. Vol. 35. No. 1. Pp. 229–235. doi:[10.1016/j.ceramint.2007.10.019](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.10.019)
2. Guo H., Ye F., Li W., Song X., Xie G. Preparation and characterization of foamed microporous mullite ceramics based on kyanite. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. No. 10. Pp. 14645–14651. doi:[10.1016/j.ceramint.2015.07.186](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.186)
3. König J., Lopez-Gil A., Cimavilla-Roman P., Rodriguez-Perez M.A., Petersen R.R., Østergaard M.B., Iversen N., Yue Y., Spreitzer M. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 247. 118574. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2020.118574](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118574)
4. Zhu M., Ji R., Li Z., Wang H., Liu L., Zhang Z. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 112. Pp. 398–405. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183)
5. Cao J., Lu J., Jiang L., Wang Z. Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass-ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 8. Pp. 10079–10084. doi:[10.1016/j.ceramint.2016.03.113](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.113)
6. Kyaw Oo D'Amore G., Caniato M., Travan A., Turco G., Marsich L., Ferluga A., Schmid C. Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 165. Pp. 1306–1315. doi:[10.1016/j.jclepro.2017.07.214](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.214)
7. Yatsenko E.A., Ryabova A.V., Goltsman B.M. Razrabotka steklokompozicionnyh pokrytij dlya zashchity stal'nyh nefteprovodov ot vnutrennej i vneshnej korrozii [Development of fiber-glass composite coatings for protection of steel oil pipelines from internal and external corrosion]. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2019. No. 12. Pp. 46–51.
8. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Kosarev A.S., Karandashova N.S., Smolii V.A., Yatsenko L.A. Sintez penoshlakostekla na osnove glicerinovoj poroobrazuyushchej smesi [The synthesis of foamed slag glass based on the glycerol pore-forming mixture]. *Sbornik tezisov mezhdunarodnoj konferencii: «Steklo: nauka i praktika»* [Collection of abstracts of the international conference: "Glass: science and practice"]. Saint Petersburg: LEMA, 2017. Pp. 214–215.
9. Ji R., Zheng Y., Zou Z., Chen Z., Wei S., Jin X., Zhang M. Utilization of mineral wool waste and waste glass for synthesis of foam glass at low temperature. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 215. Pp. 623–632. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226)
10. Jia R., Deng L., Yun F., Li H., Zhang X., Jia X. Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. *Materials Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 233. Pp. 155–162. doi:[10.1016/j.matchemphys.2019.05.065](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065)
11. Hisham N.A.N., Zaid M.H.M., Aziz S.H.A., Muhammad F.D. Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various temperatures. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 3. 570. doi:[10.3390/ma14030570](https://doi.org/10.3390/ma14030570)
12. Zeng L., Sun H., Peng T., Zheng W. Preparation of porous glass-ceramics from coal fly ash and asbestos tailings by high-temperature pore-forming. *Waste Management*. 2020. Vol. 106. Pp. 184–192. doi:[10.1016/j.wasman.2020.03.008](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.008)
13. Romero A.R., Toniolo N., Boccaccini A.R., Bernardo E. Glass-ceramic foams from 'weak alkali activation' and gel-casting of waste glass/fly ash mixtures. *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 4. 588. doi:[10.3390/ma12040588](https://doi.org/10.3390/ma12040588)
14. Ivanov K.S. Metody aktivacii shihty pri poluchenii penosteklokeramiki [Methods of the burden materials activation when the foam glass-ceramics manufacturing]. *Novye ognepuory* [New refractories]. 2018. No. 4. Pp. 107–110. doi:[10.17073/1683-4518-2018-4-107-110](https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-4-107-110)

15. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 16. Pp. 19250–19256. doi: [10.1016/j.ceramint.2016.09.091](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.091)
16. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Klimova L.V., Yatsenko L.A. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 142. No. 1. Pp. 119–127. doi: [10.1007/s10973-020-10015-3](https://doi.org/10.1007/s10973-020-10015-3)
17. Zhimalov A.A., Bondareva L.N., Igitkhanyan Y.G., Ivashchenko Y.G. Use of Amorphous Siliceous Rocks – Opokas to Obtain Foam Glass with Low Foaming Temperature. *Glass and Ceramics*. 2017. Vol. 174. Pp. 13–15. doi: [10.1007/s10717-017-9916-1](https://doi.org/10.1007/s10717-017-9916-1)
18. Kruszewski Ł., Palchik V., Vapnik Y., Nowak K., Banasik K., Galuskińska I. Mineralogical, geochemical, and rock mechanic characteristics of zeolite-bearing rocks of the hatrurim basin, Israel. *Minerals*. 2021. Vol. 11. No. 10. 1062. doi: [10.3390/min11101062](https://doi.org/10.3390/min11101062)
19. Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Ermakov A.A. Fiziko-mekhanicheskie i teplofizicheskie svojstva penosteklokeramiki na osnove kremnezemsoderzhashchej porody [Physico-mechanical and thermophysical properties of foam-glass ceramics based on silica rock]. *Vestnik BGТУ im. V.G. Shuhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. 2019. No. 5. Pp. 8–15. doi: [10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374](https://doi.org/10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374)
20. Rodin A.I., Ermakov A.A. Fiziko-mekhanicheskie svojstva penosteklokeramiki na osnove kremnistyh porod s vysokim soderzhanijem CaCO₃ [Physico-mechanical properties of silica-based foam glass ceramics with high content of CaCO₃]. *Ogarev-online*. 2021. No. 6. Access mode: <http://journal.mrsu.ru/arts/fiziko-mexanicheskie-svojstva-penosteklokeramiki-na-osnove-kremnistyx-porod-s-vysokim-soderzhanijem-caco3>
21. Rodin A.I., Ermakov A.A. Teplofizicheskie svojstva penosteklokeramiki na osnove kremnistyh porod [Thermophysical properties of silica-based foam glass ceramic]. *Vestnik PGUAS: stroitel'stvo, nauka i obrazovanie* [PGUAS Bulletin: construction, science and education]. 2020. No. 2(11). Pp. 49–55.
22. Costa F.P.D., Morais C.R.D.S., Pinto H.C., Rodrigues A.M. Microstructure and physico-mechanical properties of Al₂O₃-doped sustainable glass-ceramic foams. *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 256. 123612. doi: [10.1016/j.matchemphys.2020.123612](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123612)
23. Keyvani N., Marghussian V.K., Rezaie H.R., Kord M. Effect of Al₂O₃ content on crystallization behavior, microstructure, and mechanical properties of SiO₂–Al₂O₃–CaO–MgO glass-ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2011. Vol. 8. No. 1. Pp. 203–213. doi: [10.1111/j.1744-7402.2009.02428.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2009.02428.x)
24. Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Ermakov A.A. Issledovanie fazovyh prevrashche-nij v shihte (trepel : Na₂CO₃) dlya penosteklokeramiki [Study of phase transformations in charge (tripoli: Na₂CO₃) for glass ceramic foams]. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo* [Regional Architecture and Engineering]. 2019. No. 3(40). Pp. 16–23.
25. Millo J. *Geologiya glin (vyvetrivanie, sedimentologiya, geohimiya)* [Geology of clays (weathering, sedimentology, geochemistry)]. Leningrad: Nedra, 1968. 369 p.

Информация об авторах:

Родин Александр Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий.
E-mail: AL_Rodin@mail.ru

Ермаков Анатолий Анатольевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,
аспирант кафедры строительных материалов и технологий.
E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

Абрашин Павел Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,
лаборант кафедры строительных материалов и технологий.
E-mail: abrashin00@mail.ru

Ерофеев Владимир Трофимович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий.
E-mail: yerofeevvt@mail.ru

Information about authors:

Rodin Aleksander I.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
candidate of technical sciences, docent, associate professor of the department of building materials and technologies.
E-mail: AL_Rodin@mail.ru

Ermakov Anatoly A.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
postgraduate student of the department of building materials and technologies.
E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

Abrashin Pavel I.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
laboratory assistant of the department of building materials and technologies.
E-mail: abrashin00@mail.ru

Erofeev Vladimir T.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
doctor of technical sciences, professor, head of the department of building materials and technologies.
E-mail: yerofeevvt@mail.ru