\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

©Посаднова Н.Е., 2025.

**Строительные материалы и изделия**

**Building materials and products**

Научная статья

УДК 666.768 + 666.946.6 + 628.4.038

DOI: 10.14529/build250304

# ФОСФАТНЫЙ ЯЧЕИСТЫЙ БЕТОН НА КОРУНДОВОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ С ДОБАВКОЙ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

***Н.Е. Посаднова🖂***

*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*

***🖂*** *natasha4545@mail.ru*

***Аннотация.*** Фосфатные безобжиговые материалы являются перспективными для использования в качестве теплоизоляционных материалов. В настоящей работе показаны результаты исследования особенностей фазового состава и структуры корундового ячеистого бетона с дисперсными добавками – отходами шамотного производства и диалюминия триоксидом с примесью дихромтриоксида. Был получен бетон марки по плотности D800 и предельной температурой применения 1600 °С. В работе были использованы методы дифференциально-термического, рентгенофазового анализа и метод электронной микроскопии. Установлено, что окончательно фазовый состав формируется при температуре, близкой к температуре применения –1600 °С, и включает в себя жаростойкие соединения – корунд, ортофосфат алюминия в кристобалитовой форме и магниевую шпинель. Показано, что структура разработанного ячеистого бетона содержит поры размером до 3 мм, представлена алюмофосфатами сложного состава (алюмофосфаты с замещениями). Установлено, что ортофосфат алюминия формируется в виде пластинчатых кристаллов. Показано, что нагрев ячеистого бетона до температуры применения не оказывает существенного влияния на структуру. Выявлено, что ячеистый бетон с добавкой отходов шамотного производства имеет более плотную структуру в сравнении с бездобавочным составом. Изучены основные жаростойкие свойства разработанного ячеистого бетона. Показано, что введение добавки отходов шамотного производства снижает стоимость ячеистого бетона, не оказывает негативного влияния на жаростойкие свойства.

***Ключевые слова:*** алюмосиликатные отходы, промышленные отходы, фосфатный бетон, ячеистый бетон, жаростойкие свойства, структура

*Для цитирования.* Посаднова Н.Е. Фосфатный ячеистый бетон на корундовом заполнителе с добавкой алюмосиликатных отходов промышленности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2025. Т. 25, № 3. С. 35–40. DOI: 10.14529/build250304

Original article

DOI: 10.14529/build250304

**PHOSPHATE CORUNDRUM CELLULAR CONCRETE
WITH ALUMINOSILICATE INDUSTRIAL WASTE ADDED**

***N.E. Posadnova🖂***

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

***🖂*** *natasha4545@mail.ru*

***Abstract***. Phosphate non-fired materials are promising for use as heat-insulating materials. The paper presents the study results of the phase composition and structure of corundum cellular concrete with dispersed additives – fireclay production wastes and dialuminium trioxide with dichromium trioxide admixture. D800 concrete with a maximum application temperature of 1600 °C is obtained. Differential thermal analysis, X-ray phase analysis and electron microscopy methods are used in the study. The final phase composition is formed at a temperature close to the application temperature of 1600 °C and includes heat-resistant compounds such as corundum, aluminium orthophosphate in a cristobalite form, and magnesium spinel. The structure of the cellular concrete contains 3 mm pores, represented by complex aluminium phosphates (substituted aluminium phosphates). Aluminium orthophosphate forms in plate-like crystals. Heating cellular concrete to the application temperature does not significantly affect

**Введение**

its structure. Cellular concrete with the fireclay production waste additives is found to have a denser structure compared to the composition with no additives. The paper describes the main heat-resistant properties of the developed cellular concrete. It shows that the addition of fireclay production wastes reduces the cost of cellular concrete and does not significantly affect its heat-resistant properties.

***Keywords:*** aluminosilicate waste, industrial waste, phosphate concrete, cellular concrete, heat-resistance properties, structure

***For citation.*** Posadnova N.E.Phosphate corundrum cellular concrete with aluminosilicate industrial waste added. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2025;25(3):35–40. (in Russ.). DOI: 10.14529/build250304

Поиск теплоизоляционных материалов для высоких температур, способных экономить тепловые ресурсы путем снижения теплопотерь через футеровку, всегда являлся актуальным вопросом для промышленности. Начиная с конца ХХ в. особое внимание уделяется безобжиговым материалам, твердеющим без дополнительной термообработки при сохранении высоких эксплуатационных характеристик [1]. Постепенно они вытесняют обжиговые материалы (легковесы, волокнистые материалы на керамической связке). Среди таких материалов особое положение заняли ячеистые бетоны на фосфатных связках, главным образом алюмофосфатной (АФС) и ее модификациях. Они характеризуются высокой предельной температурой применения, низкими усадками, повышенной термической стойкостью [2–4]. Применение в производстве фосфатных ячеистых материалов чистого сырья (корунд, глинозем, АФС) приводит к высоким материальным затратам, повышая себестоимость теплоизоляционных изделий.

Важным преимуществом технологии фосфатных материалов является возможность полной или частичной замены чистого сырья промышленными отходами соответствующего состава (глиноземистого, алюмосиликатного, хромглиноземистого). Помимо эффекта понижения себестоимости некоторые виды примесей, содержащиеся в отходах, могут улучшать свойства фосфатного связующего и ячеистого бетона на его основе, выполняя роль модифицирующих добавок. Согласно ранее выполненным работам, использование промышленных отходов (алюмосиликатных, глиноземистых, высокоглиноземистых, бор- и хромсодержащих и пр.) позволяет получать новые виды фосфатных материалов с высокими эксплуатационными свойствами [5–9].

Известны работы по получению глиностофосфатного (глинофосфатного) связующего на основе чистого технического алюмосиликатного сырья (огнеупорных глин) и тяжелого жаростойкого бетона на его основе [10]. Однако использование техногенных алюмосиликатных отходов как тонкомолотой добавки в жаростойком ячеистом бетоне изучено слабо.

Использование дисперсных добавок из промышленных отходов (алюминотермические шлаки, вторичный шамот и корунд и пр.) в качестве добавки в вяжущие и как компонента тяжелого жаростойкого фосфатного бетона ранее рассматривали в многочисленных работах [11–16]. Особый интерес представляет использование алюмосиликатных промышленных отходов, в частности отходов шамотного производства, отобранных из системы аспирации шамотных мельниц. Применение их в ячеистых фосфатных материалах не рассматривалось, эти отходы находятся в дисперсном состоянии, не требуют помола и фракционирования, обладают достаточно высокой активностью по отношению к ортофосфорной кислоте.

Из всего вышесказанного следует, что использование алюмосиликатных отходов шамотного производства в технологии фосфатных ячеистых бетонов в целом является перспективным – как по причине доступности отходов в больших объемах (огнеупорная, металлургическая отрасли), так и благодаря отсутствию необходимости в дополнительном измельчении.

**Материалы и методы**

Для изготовления жаростойкого бетона на фосфатном связующем применяли такие материалы, как (табл. 1):

* корундовый заполнитель – порошок нормального электрокорунда с удельной поверхностью 110 м2/кг;
* дисперсную добавку – диалюминий триоксид с примесью дихромтриоксида по ТУ 2123-024-73776139-2011 с удельной поверхностью 350 м2/кг;
* дисперсную добавку – отходы шамотного производства с удельной поверхностью 310 м2/кг;
* газообразователь (пудра алюминиевая марки ПАП-1 по ГОСТ 5494‑95).

**Таблица 1**

**Свойства заполнителей и добавок**

|  |  |
| --- | --- |
| Наименование | Массовая доля, % |
| Al2O3 | Cr2O3 | SiO2 | MgO |
| Порошок корунда | 89–92 | 0,6 | 1,5–2 |  |
| Отходы шамотного производства | 35–37 | – | 55–57 | – |
| Диалюминийтриоксид | 71–74 | 9–14 | 11–13 | 0,6–0,8 |

Как показали ранее проведенные исследования, нецелесообразно вводить алюмосиликатные отходы в количестве свыше 10 % [17]. Соответственно, в состав корундового ячеистого бетона добавка отходов шамотного производства вводилась в количестве 10 масс. %.

Оценку свойств жаростойкого ячеистого бетона производили в соответствии с ГОСТ 20910‑2019. Фазовый состав и структуру оценивали качественными методами – дифференциально-термическим анализом (ДТА), рентгенофазовым анализом (РФА), методом электронной микроскопии.

**Результаты**

Жаростойкие свойства ячеистого бетона помимо вида связующего зависят от качества сформированной структуры и фазового состава [17–19]. Вследствие этого было проведено изучение фазового состава и структуры корундового ячеистого бетона с добавкой отходов шамотного производства.

Согласно данным дериватографии, при повышении температуры в фосфатном ячеистом бетоне на связующем, полученном из алюмосиликатных отходов, отмечены как экзатермические, так и эндотермические процессы. Постепенное нагревание ячеистого бетона от температуры 20 °С до 255 °С приводит к потере массы порядка 6–7 % за счет удаления свободной и химически связанной воды из аморфных алюмофосфатов. Дальнейший нагрев до температуры 520 °С приводит к формированию Al(PO3)­3 (метафосфата алюминия). При повышении температуры до 680 °С отмечено образование *γ*‑глинозема за счет окисления металлического алюминия, который не прореагировал с фосфатным связующим. Данное явление отмечается и в ячеистом бетоне на других фосфатных связующих [2, 5, 6, 11, 16]. Нагрев до температуры 880 °С способствует образованию ортофосфата алюминия (тридифита), далее, при температуре около 980 °С, отмечается кристаллизация корунда (образуется из глинозема).



**Рис. 1. Рентгенограмма корундового ячеистого бетона:**

**∆ – Al (алюминий); Ō – γ‑Al2O3 (глинозем); Ø – AlPO4 (фосфат алюминия – тридифит);
● – AlPO4 (фосфат алюминия – кристобафит); 🞊 – α‑Al2O3 (корунд); 🞰 – MgO∙Al2O3 (шпинель)**

При исследовании жаростойких свойств особое значение придается изменениям фазового состава, происходящим в ячеистом бетоне при нагреве до температуры применения. Анализ рентгенограммы корундового бетона (рис. 1) показал: фазовый состав меняется постепенно и к температуре применения 1600 °С преимущественно состоит из огнеупорных соединений, характерных и для плотных фосфатных бетонов – корунда, ортофосфата алюминия (кристобафит) и магниевой шпинели. Значительная часть приходится на корунд, попавший в анализируемую пробу из заполнителя. При этом отмечено, что его количество возрастает после нагрева до 1600 °С. Это подтверждает данные ДТА о том, что формируется вторичный корунд из алюмофосфатного цементного камня. Формирование огнеупорного соединения – магниевой шпинели – происходит вследствие взаимодействия примесей добавки дихротриоксида и глинозема. Доля шпинели в сравнении с другими соединениями низкая, что связано с содержанием оксида магния в сырье в небольшом количестве – 0,6–0,8 масс. % (см. табл. 1).

Структура корундового бетона сформирована сочетанием пор различного размера. На сколе материала равномерно расположены крупные поры с диаметром в пределах 0,5–3 мм (рис. 2а). Межпоровые стенки сформированы алюмофосфатами, которые образуют пластинчатые структуры (рис. 2б). Отмечается наличие как мелких, так и крупных пластинок. Крупные пластинки сформировались на поверхности корундового заполнителя за счет взаимодействия фосфатного связующего с алюминиевой пудрой и дисперсными добавками. Формирование мелких пластинок произошло вне поверхности корундового заполнителя. По данным спектрального анализа, отмечено формирование алюмофосфатов, содержащих катионы хрома Cr3+ и кремния Si4+. Однако индивидуальные соединения хрома и кремния не фиксируются. Вероятно, кремний и хром путем замещения катионов алюминия Al3+ встраиваются в кристаллическую решетку алюмофосфатов.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\PosadnovaNE\Desktop\Корундовый газобетон\111\01.bmp | C:\Users\PosadnovaNE\Desktop\Корундовый газобетон\111\03.bmp |
| **а)** | **б)** |

**Рис. 2.** **Ячеистый корундовый бетон: а) увеличение х30; б) х250**

**Таблица 2**

**Жаростойкие свойства корундового ячеистого бетона марки по плотности D800**

|  |  |
| --- | --- |
| Свойство | Корундовый ячеистый бетон |
| без добавки | с добавкой |
| Средняя плотность, кг/м3 | 810 | 817 |
| Прочность при сжатии (сушка при 105°С), МПа | 2,42 | 3,01 |
| Прочность при сжатии после нагрева до температуры 1600 °С, МПа | 2,29 | 2,96 |
| Остаточная прочность при температуре 800 °С, % | 112 | 108 |
| Температурные деформации, % | –1,72 | –1,70 |
| Марка по термостойкости, Т2 | Т2 15 | Т2 15 |
| Предельная температура применения, °С | 1600 | 1600 |

По мере повышения температуры с 800 до 1600 °С структура корундового бетона не претерпевает значительных изменений, переуплотнение бетона не зафиксировано. При этом, в сравнении с корундовым ячеистым бетоном без добавки отходов шамотного производства, немного уплотняется за счет высокой дисперсности использованной добавки.

Жаростойкие свойства разработанного корундового бездобавочного бетона и бетона с добавкой отхода шамотного производства марки по плотности D800 показаны в табл. 2.

Использование добавки алюмосиликатных отходов шамотного производства в количестве 10 масс. % способствовало увеличению прочности при сжатии. Средняя плотность и термостойкость разработанных бетонов остались на одном уровне.

Сохранение уровня средней плотности связано с тем, что межпоровые стенки в ячеистом бетоне с добавкой отходов формируются более прочными, при этом за счет химической активности добавки вспучивание бетонной смеси протекает более интенсивно.

**Заключение**

По результатам проведенных исследований разработан фосфатный ячеистый бетон на связующем, полученном с применением алюмосиликатных отходов, корундовом заполнителе с добавками отходов шамотного производства и диалюминия триоксида, марки по плотности D800 и предельной температурой применения 1600 °С. Анализ данных термогравиметрического и рентгенофазового анализа показал, что в разработанном ячеистом бетоне образуются жаростойкие соединения – корунд, ортофосфат алюминия (кристобафита), небольшие количества магниевой шпинели. Согласно данным электронной микроскопии, отмечается формирование однородной структуры ячеистого бетона с крупными порами диаметром до 3 мм, причем поровая структура практически не меняется при нагревании материала. Использование 10 масс. % дисперсной алюмосиликатной добавки отхода шамотного производства в фосфатном ячеистом бетоне положительно повлияло на механические свойства бетона.

**Список литературы**

1. Соков В.Н. Энергоэффективная скоростная технология получения высокотемпературных теплоизоляционных материалов: монография. М.: МГСУ, 2014. 328 с.
2. Abyzov V.A. Lightweight refractory concrete based on aluminum-magnesium-phosphate binder // 2nd International conference on industrial engineering, ICIE, Procedia Engineering. 2016. Vol. 150, pp. 1440–1445.
3. Голынко-Вольфсон С.Л., Сычев М.М., Судакас Л.Г. и др. Химические основы технологии и применения фосфатных связок и покрытий. Л.: Химия, 1968. 192 с.
4. Копейкин В.А., Климетьева В.С., Красный Б.Л. Огнеупорные растворы на фосфатных связующих. М.: Металлургия, 1986. 104 с.
5. Абызов А.Н., Абызов В.А., Магилат В.А. и др. Жаростойкий газобетон на алюмоборфосфатном связующем // Строительные материалы и изделия: сборник научных трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2002. С. 143–148.
6. Абызов В.А. Выбор рациональных областей применения промышленных отходов в технологии жаростойкого бетона // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2008. № 25 (125). С. 37–39.
7. Кирьянова Л.А., Абызов А.Н. Ячеистые жаростойкие бетоны на алюмофосфатном связующем и шамоте // Жаростойкие бетоны, материалы и конструкции: сборник научных трудов. Челябинск: УралНИИстромпроект, 1981. С. 63–70.
8. Некрасов К.Д., Александрова Г.Н. Высокоогнеупорный бетон на алюмохромфосфатной связке // Жаростойкие бетоны. 1974. С. 113–123.
9. Судакас Л.Г. Фосфатные вяжущие системы. СПб.: Квинтет, 2008. 254 с.
10. Zemlyanoi K.G., Kamenskih V.A. Dependence of properties of clay-phosphate binder on production technology // Refractories and industrial ceramics. 2010. Vol. 51(3), pp. 206–209.
11. Клинов О.В. Жаростойкий газобетон на основе алюмосиликофосфатного связующего с добавкой огнеупорного волокна: автореф. дис. канд. техн. наук. Челябинск, 2008. 22 с.
12. Khlystov A., Shirokov V., Chernova E. Problems of air setting phosphatic binding and heat-resistant materials, based on them // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153, pp. 271–276.
13. Study of thermal transformations of aluminum phosphate binder and composites on its basis with various fillers / P.L. Zhuravleva, N.S. Kitaeva, Y.M. Shiryakina et al. // Russian Journal of Applied Chemistry. 2016. Vol. 89(3), pp. 367–373.
14. Abyzov V. Refractory cellular concrete based on phosphate binder from waste of production and recycling of aluminum // International conference on industrial engineering, ICIE. 2017. Vol. 206, pp. 783–789.
15. Латыпова Л.И. Жаростойкие фосфатные материалы на основе высокоглиноземистых отходов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2012. Вып. 15, № 38. С. 69–71.
16. Абызов А.Н., Клинов О.В., Магилат В.А. Жаростойкий фосфатный газобетон на основе промышленных отходов // Информ. Листок ЦНТИ № 83-61-01. Челябинск: ЦНТИ. 2001. 3 с.
17. Abyzov V.A., Posadnova N.E. Development of fire-resistant phosphate adhesive based on alumina and aluminosilicate dispersed industrial waste // Refractories and industrial ceramics. 2024. Vol. 64, no. 5, pp. 550–554.
18. Characterizing the foam-shell microstructure of industrial ultra-light foamed concrete cast under different temperatures / Jin L., Chen S., Zhao Y., Zeng Q., et al. // Materials Characterization. 2021. Vol. 173, p. 110938.
19. Recent advances in sustainable lightweight foamed concrete incorporating recycled waste and byproducts: a review / Yang S., Wang X., Hu Z., Li J., el al. // Construction and Building Material. 2023. Vol. 403, p. 133083.

# References

1. Sokov V.N. Energoeffektivnaya skorostnaya tekhnologiya polucheniya vysokotemperaturnykh teploizolyatsionnykh materialov: monografiya [Energy-efficient high-speed technology for producing high-temperature thermal insulation materials: monograph]. Moscow, MGSU Publ., 2014. 328 p. (in Russ.)
2. Abyzov V.A. Lightweight refractory concrete based on aluminum-magnesium-phosphate binder. 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE, Procedia Engineering, 2016, vol. 150, pp. 1440–1445.
3. Golynko-Vol'fson S.L., Sychev M.M., Sudakas L.G., et al. Khimicheskiye osnovy tekhnologiy i primeneniya fosfatnykh svyazok i pokrytiy [Chemical principles of technology and application of phosphate binders and coatings]. L.: Khimiya, 1968. 192 p. (in Russ.)
4. Kopeykin V.A., Klimet'eva V.S., Krasnyy B.L. Ogneupornyye rastvory na fosfatnykh svyazuyushchikh [Refractory mortars on phosphate binders]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 104 p. (in Russ.)
5. Abyzov A.N., Abyzov V.A., Magilat V.A. [Heat-resistant aerated concrete on alumino-boron-phosphate binder]. In: Stroitel'nyye materialy i izdeliya: sbornik nauchnykh trudov [Construction materials and products: collection of scientific papers]. 2002, pp. 143–148. (in Russ.)
6. Abyzov V.A. [Selection of rational areas of application of industrial waste in heat-resistant concrete technology]. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture, 2008, no. 25 (125), pp. 37–39. (in Russ.)
7. Kir'yanova L.A. [Cellular heat-resistant concretes on aluminophosphate binder and chamotte]. In: Zharostoykiye betony, materialy i konstruktsii: sbornik nauchnykh trudov [Heat-resistance concrete, materials and construction: collection of scientific papers]. Chelyabinsk, UralNIIstromproyekt, 1981, pp. 63–70. (in Russ.)
8. Nekrasov K.D., Aleksandrova G.N. [Higly refractory concrete on aliminochromophosphate binder]. Zharostoykiye betony [Heat-resistance concrete], 1974. pp. 113–123. (in Russ.)
9. Sudakas L.G. Fosfatnyye vyazhushchiye sistemy [Phosphate binder systems]. SPb., Kvintet, 2008. 254 p. (in Russ.)
10. Zemlyanoi K.G., Kamenskih V.A. Dependence of properties of clay-phosphate binder on production technology. Refractories and industrial ceramics, 2010, vol. 51(3), pp. 206–209.
11. Klinov О.V. Zharostoykiy gazobeton na osnove alyumosilikofosfatnogo svyazuyushchego s dobavkoy ogneupornogo volokna: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. [Heat-resistant aerated concrete based on an aluminum silicophosphate binder with the addition of refractory fiber. Abstract of cand. sci. diss.] Chelyabinsk; 2008. 22 p. (in Russ.)
12. Khlystov A., Shirokov V., Chernova E. Problems of Air Setting Phosphatic Binding and Heat-resistant Materials, Based on them. Procedia Engineering, 2016, vol. 153, pp. 271–276.
13. Zhuravleva P.L., Kitaeva N.S., Shiryakina Y.M. et al. Study of thermal transformations of aluminum phosphate binder and composites on its basis with various fillers. Russian Journal of Applied Chemistry, 2016, vol. 89(3), pp. 367–373.
14. Abyzov V. Refractory cellular concrete based on phosphate binder from waste of production and recycling of aluminum. International Conference on Industrial Engineering, ICIE, Procedia Engineering, 2017, vol. 206, pp. 783–789.
15. Latipova L.I. [Heat-resistant phosphate materials based on high-alumina waste]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2012, vol. 15, no. 38, pp. 69–71. (in Russ.)
16. Abyzov V.A., Klinov О.V., Magilat V.A. [Heat-resistant phosphate aerated concrete based on industrial waste]. Informatsionnyy Listok TsNTI № 83-61-01 [Bulletin of Scientific and Technical Information Center № 83-61-01], Chelyabinsk, 2001, 3 p. (in Russ.)
17. Abyzov V.A., Posadnova N.E. Development of fire-resistant phosphate adhesive based on alumina and aluminosilicate dispersed industrial waste. Refractories and industrial ceramics, 2024, vol. 64, no. 5, pp. 550–554.
18. Jin L., Chen S., Zhao Y., Zeng Q., et al. Characterizing the foam-shell microstructure of industrial ultra-light foamed concrete cast under different temperatures. Materials Characterization, 2021, vol. 173, p. 110938.
19. Yang S., Wang X., Hu Z., Li J., el al. Recent advances in sustainable lightweight foamed concrete incorporating recycled waste and byproducts: a review. Construction and Building Material, 2023, vol. 403, p. 133083.

***Информация об авторе:***

**Посаднова Наталья Евгеньевна,** аспирант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; natasha4545@mail.ru

***Information about the author:***

**Natalia E. Posadnova,** Post-Graduate Student, Department of Building materials and products, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; natasha4545@mail.ru

***Статья поступила в редакцию 26.02.2025, принята к публикации 12.03.2025.***

***The article was submitted 26.02.2025, approved after reviewing 12.03.2025.***