

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-21-29

^{1,*}Князева С.А., ¹Яковлев Г.И., ²Бурьянов А.Ф., ¹Жуков А.Н., ¹Киришин И.А.¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: SvetikSm_Knyazeva@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ВЯЖУЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОЙ КЕРАМЗИТОВОЙ ПЫЛИ

Аннотация. Производство портландцемента связано с высоким потреблением минерального сырья и значительными выбросами в атмосферу углекислого газа. Поэтому замена части цемента техногенными минеральными добавками в цементных композициях является рациональным способом утилизации отходов производства. Также использование в качестве минеральных добавок отходов промышленности позволяет решать экологические проблемы и задачи снижения потребления первичных природных ресурсов.

Статья посвящена исследованию гидравлической активности термически активированной керамзитовой пыли, применяемой в качестве активной минеральной добавки в цементных композициях. Керамзитовая пыль – это отход производства керамзитового гравия, улавливаемый в системах пылеочистки обжиговых печей: пылеосадительных камерах, циклонах, фильтрах.

Комплексное исследование затвердевшей системы, содержащей керамзитовую пыль и воду было проведено с применением ИК-спектрального анализа, дифференциально-сканирующей калориметрии и растровой электронной микроскопии с рентгеновским микроанализом.

Установлено, что после выдерживания в воде обожженных образцов их прочность увеличивается на 80 %. При этом основными продуктами гидратации обожжённой керамзитовой пыли являются три вида новообразований – волокнистые кристаллы гидросульфатоалюмината кальция, гидросиликаты кальция в виде крестообразных двойников, аморфизированные сферолитоподобные образования на основе низкоосновных гидросиликатов кальция.

Ключевые слова: керамзитовая пыль, минеральная добавка, термическая активация, портланд-цемент, утилизация техногенных отходов.

Введение. Производство цементного бетона в настоящее время сложно представить без введения в его состав минеральных и химических добавок. Зачастую в качестве активных минеральных добавок применяются добавки на основе отходов промышленности, содержащие большое количество активного кремнезёма аморфной структуры, метакаолинита, глинозёма, обезвоженных алюмосиликатов, которые при взаимодействии с известью в цементном тесте образуют труднорастворимые соединения [1–3]. Одним из таких отходов производства является керамзитовая пыль, образующаяся в качестве побочного продукта при производстве керамзитового гравия во вращающихся печах при температурах 900–1200 °С [4, 5] и улавливаемая в системах пылеочистки обжиговых печей.

В работах [6, 7] представлены результаты исследования состава и гидравлической активности керамзитовой пыли с предприятия ООО «Ижевский завод кирпича и керамзита», которые показали, что в составе отхода присутствуют кристаллический и аморфный оксид кремния SiO₂, оксид кальция CaO, карбонат кальция CaCO₃, низкоосновные силикаты кальция, полевые шпаты (ортоклаз) и монтмориллонит.

Согласно проведенным исследованиям, при затворении водой керамзитовой пыли оксид кальция CaO переходит в его гидроксид Ca(OH)₂, который взаимодействует с аморфным кремнезёмом, образуя гидросиликат кальция типа CSH(B) и гидрат геленита 2CaO·Al₂O₃·SiO₂·8H₂O [7–10].

Стоит отметить, что керамзитовая пыль достаточно неоднородный материал по структуре составляющих. В её составе присутствуют частично оплавленные фрагменты метаморфизированных минералов исходной глины в виде круглых включений, которые могут говорить не только о дегидратации глинистых минералов, но и о химическом взаимодействии минералов глины с легкоплавкими составляющими, такими как полевые шпаты, карбонат кальция. Последние снижают температуру спекания легкоплавких глинистых минералов, формируя аморфные образования, способные к проявлению гидравлических свойств. В то же время в составе керамзитовой пыли присутствуют недообожжённые частицы глины, поэтому при длительном погружении в воду затвердевшие образцы, полученные путём затворения пыли водой, обладая низкой водостойкостью, разрушались. Решению проблемы повышения водостойкости вяжущего за

счёт термообработки керамзитовой пыли посвящена данная работа.

Материалы и методы. В исследовании использовалась керамзитовая пыль с предприятия

ООО «Ижевский завод кирпича и керамзита» (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. а) общий вид циклона для улавливания керамзитовой пыли, б) керамзитовая пыль, отобранная из циклона

Термообработке подвергались образцы кубики (2×2×2 см), изготовленные из смеси, содержащей керамзитовую пыль и воду в отношении 2,6:1. Затвердевшие в нормальных условиях кубики обжигали при температуре 800 °С. Скорость нагрева составляла 9,4 °С/мин., время последующей изотермической выдержки в печи составляло 50 мин. С целью исследования изменения механических характеристик часть образцов после обжига выдерживали в воде в течение 14 суток.

Комплексное исследование образцов было проведено с применением следующих методов:

- дифференциально-сканирующая калориметрия на дериватографе TGA/DSC1 Starsystem производства Mettler Toledo от 60 °С до 1100 °С со скоростью 30 °С/мин;

- ИК-спектральный анализ на спектрометре IRAffinity-1 производства Shimadzu в области частот 400–4000 см⁻¹;

- анализ микроструктуры и рентгеновский микроанализ на сканирующем электронном микроскопе Quattro ESEM Thermo Fisher Scientific.

- испытание на сжатие на прессе ПГМ-100МГ4 производства ООО «СКБ-Стройприбор» (Челябинск).

Основная часть.

1. Физико-механические характеристики

Прочность на сжатие определялась для образцов до и после обжига, а также после выдерживания в воде обожженных образцов в течение 14 суток. Среднее значение предела прочности на сжатие образцов до и после обжига не изменилось, но при этом выдержанные в воде образцы показали повышение прочности на 80%.

Учитывая увеличение прочности на сжатие обожженных образцов после выдерживания в воде, было принято решение изучить их физико-химические характеристики с целью установления вяжущих свойств обожженной керамзитовой пыли. Кроме того, того был проведен рентгеновский микроанализ новообразований полученной вяжущей матрицы в затвердевших образцах.

2. ИК-спектральный анализ

На ИК-спектре обожженных образцов до выдерживания в воде и после (рис. 2) отмечены выраженные широкие полосы в области частот 1001,06–921,97 см⁻¹ и 775,38 см⁻¹, соответствующие группировке -Si-O-Si- и подтверждающие формирование гидросиликатов кальция разной основности. Полосы 455,2 см⁻¹, 426,27 см⁻¹ связаны с деформационными колебаниями связей Me-O.

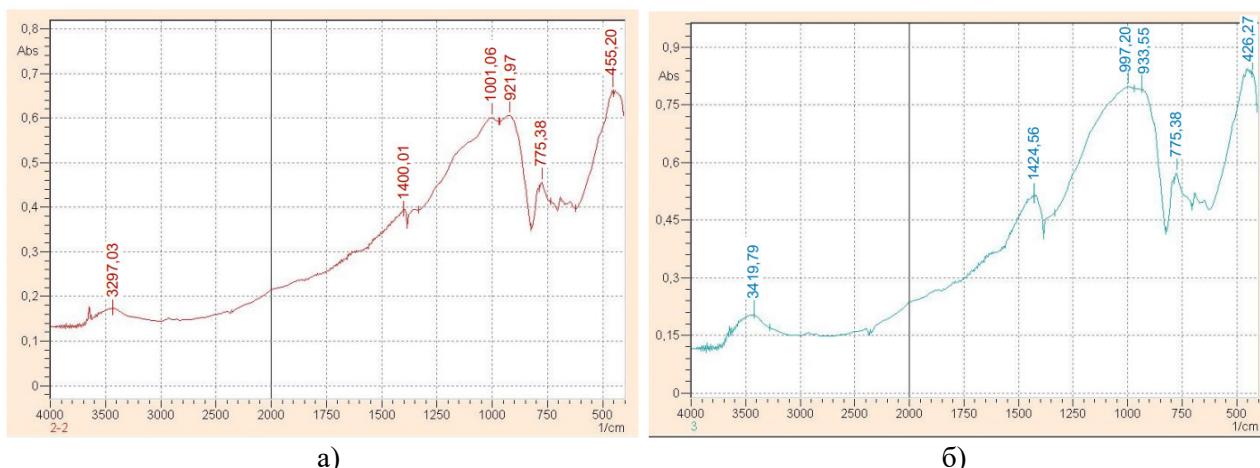


Рис. 2. а) ИК-спектр обожжённых образцов до выдерживания в воде, б) ИК-спектр обожжённых образцов после выдерживания в воде

Полосы 1400,01 см⁻¹, 1424,56 см⁻¹ соответствуют колебаниям группы CO₃²⁻. Широкие полосы 3419,79 см⁻¹ и 3297,03 см⁻¹, соответствуют валентным колебаниям связи О-Н связанной воды [11, 12]. Широкий характер полос свидетельствует об участии гидроксильной группы в образовании водородных связей.

3. Дифференциально-сканирующая калориметрия

На спектре ДСК обожженных образцов (рис. 3) отмечено незначительная потеря кристаллизационной воды при температуре 152 °С. Эндотермический эффект при температуре 452,5 °С связан с дегидратацией гидроксида кальция, сформировавшегося за счет поглощения образцом паров воды из окружающего воздуха. Эндотермический эффект при температуре 576 °С связан с

перекристаллизацией оксида кремния в составе керамзитовой пыли. При температуре 706 °С наблюдается эндотермический эффект вследствие потерь кристаллогидратной воды из гидросиликатов кальция, сформировавшихся при взаимодействии аморфного кремнезема с гидроксидом кальция [13–15]. При этом нужно отметить, что общая потеря массы навески при нагревании до температуры 706 °С не превышает 1,4 % от общей массы навески, что говорит о слабой активности обожженной керамзитовой пыли при воздействии влаги из окружающего воздуха.

Слабый экзотермический эффект при температуре 945 °С вызван перекристаллизацией безводного силиката кальция в волластонит.

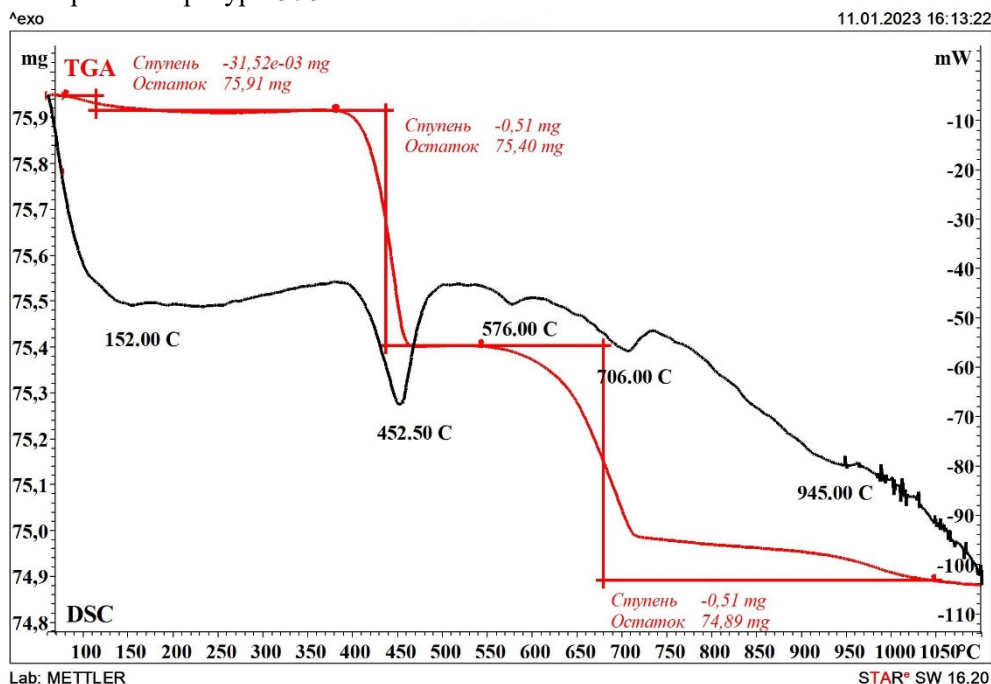


Рис. 3. Дериватограмма обожжённых образцов до выдерживания в воде

На спектре ДСК образцов после обжига с последующим выдерживанием в воде (рис. 4) все

перечисленные эффекты на рис. 3 повторяются с разницей общей потери массы навески до 2,9 %.

Этот показатель говорит о повышении гидравлической активности обожженной керамзитовой пыли при выдерживании в воде, что было подтверждено механическими испытаниями сформованных и затвердевших образцов. При этом наряду с удалением кристаллогидратной воды при температуре 156 °С отмечен эндотермический эффект при температуре 481,5 °С, связан-

ный с дегидратацией гидроксида кальция. Эндотермические эффекты при температурах 576,5 °С и 745 °С связаны с перекристаллизацией оксида кремния в составе гидратированной керамзитовой пыли и дегидратацией гидросиликата кальция. Отмечается слабый экзотермический эффект при температуре 897 °С связанный с перекристаллизацией безводного силиката кальция в волластонит.

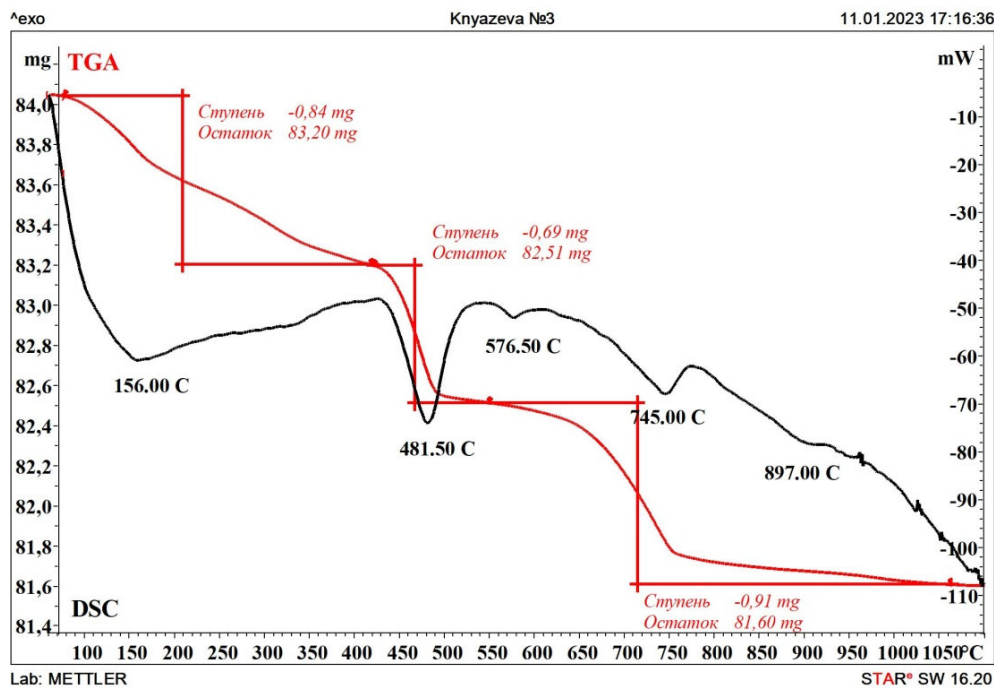


Рис. 4. Дериватограмма обожжённых образцов после выдерживания в воде

4. Исследование микроструктуры и рентгеновский микроанализ образцов

Анализ микроструктуры вяжущей матрицы показал наличие трех видов новообразований. Поры в вяжущей матрице заполнены крупными кристаллами гидросульфалюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ длиной до 30 мкм (рис. 5). Формирование этих новообразований подтверждено рентгеновским микроанализом,

который показал наличие атомов кальция, кремния, алюминия и серы (рис. 6) [8].

В структуре вяжущей матрицы присутствуют дисперсные гидроалюмосиликаты кальция в виде крестообразных двойников (рис. 7) с размерами до 600 нм. На рис. 8 приведена спектральная информация, полученная при проведении рентгеновского микроанализа и подтверждающая наличие кальция, кремния и алюминия в составе отмеченных новообразований.

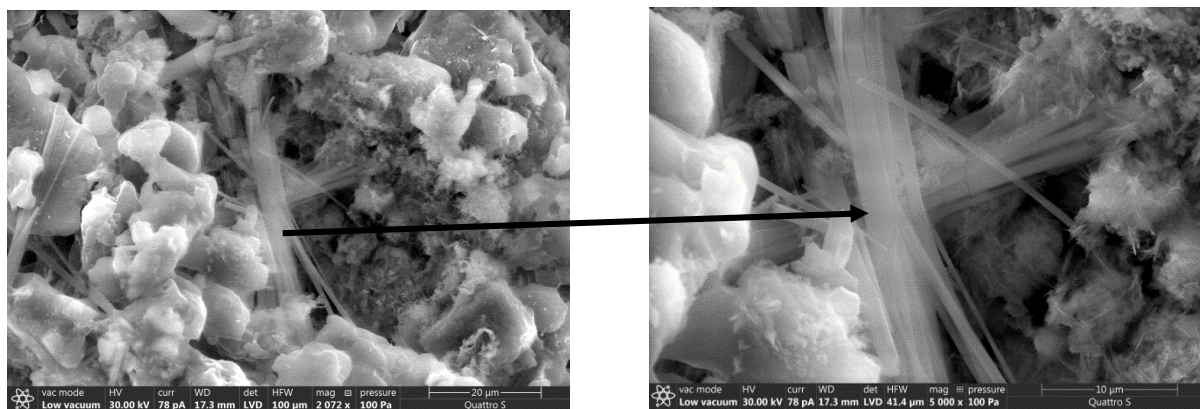


Рис. 5. Микроструктура гидросульфалюмината кальция в составе гидратированной керамзитовой пыли после обжига (стрелкой показано обрастание гидроалюмосиликатами кальция поверхности кристаллов гидросульфалюмината к альция)

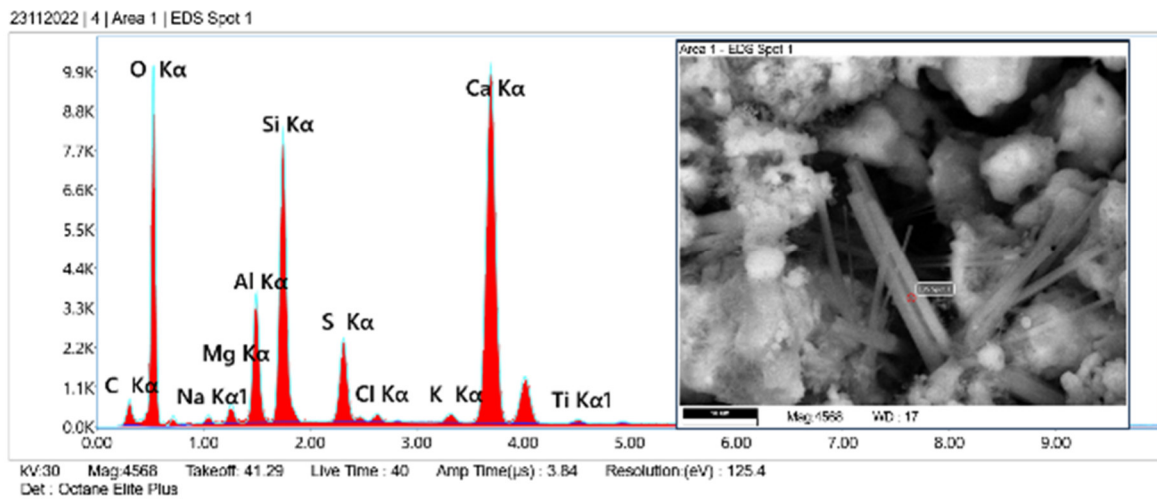


Рис. 6. Рентгеновский микроанализ кристаллов гидросульфоалюмината кальция в составе гидратированной керамзитовой пыли после обжига

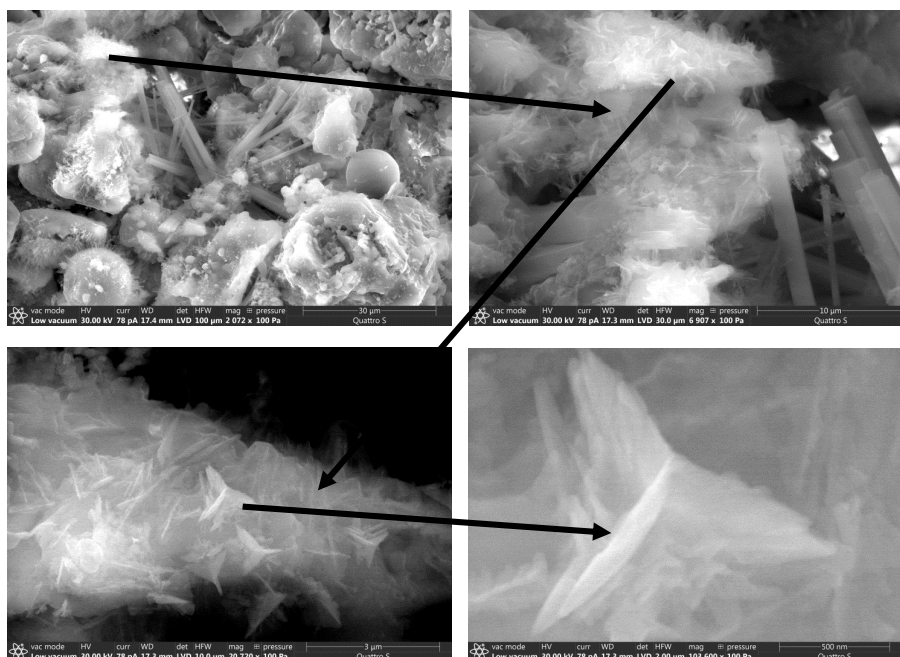


Рис. 7. Микроструктура гидроалюмосиликата кальция в составе гидратированной керамзитовой пыли после обжига

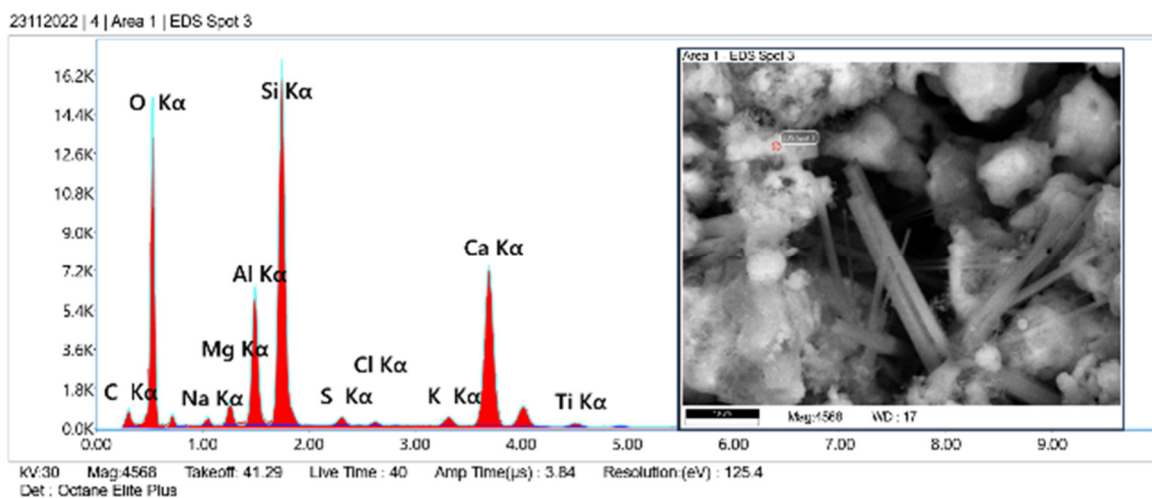


Рис. 8. Рентгеновский микроанализ кристаллитов гидроалюмосиликата кальция в составе гидратированной керамзитовой пыли после обжига

Наряду с отмеченными новообразованиями установлено также формирование аморфизированных сферолитоподобных образований на основе низкоосновных гидросиликатов кальция (рис. 9), которые покрыты гидроалюмосиликатами кальция. Формирование гидросиликатов кальция низкой основности подтверждается

рентгеновским микроанализом, на спектре которого отмечено наличие атомов кальция, кремния и кислорода (рис. 10). Необходимо отметить, что гидросиликаты кальция низкой основности определяют повышенную прочность вяжущей матрицы в сравнении с высокоосновными гидросиликатами кальция.

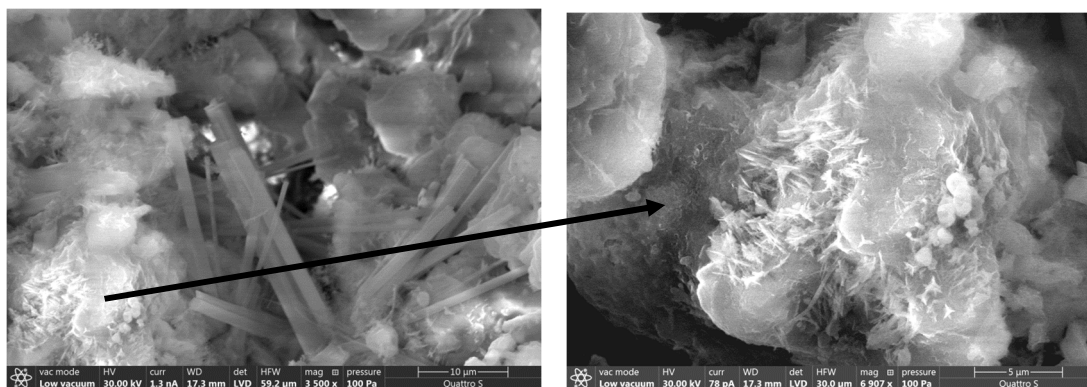


Рис. 9. Микроструктура гидроалюмосиликатов кальция на поверхности аморфизированных сферолитоподобных гидросиликатов кальция в составе гидратированной керамзитовой пыли после обжига

23112022 | 4 | Area 1 | EDS Spot 4

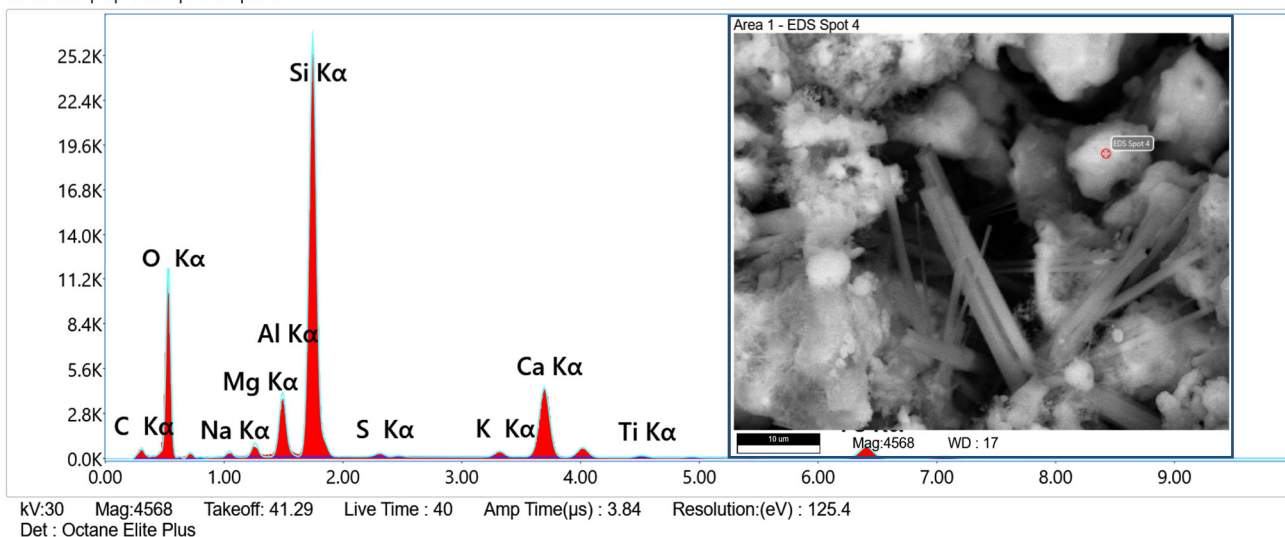


Рис. 10. Рентгеновский микроанализ аморфизированных глобулярных гидросиликатов кальция в составе гидратированной керамзитовой пыли после обжига

Выводы.

1. Установлено, что керамзитовая пыль обладает гидравлической активностью. Основными продуктами гидратации обожжённой керамзитовой пыли являются три вида новообразований – волокнистые кристаллы гидросульфата алюмината кальция, гидроалюмосиликаты кальция в виде крестообразных двойников, аморфизированные сферолитоподобные образования на основе низкоосновных гидросиликатов кальция.

2. Термическая активация керамзитовой пыли способствует улучшению химического взаимодействия между её составляющими, являющимися плавнями.

3. Отмечено повышение прочности обожжённых образцов на основе керамзитовой пыли, затворённой водой после выдерживания их в воде на 80 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Кузьменков М.И., Куницкая Т.С. Вяжущие вещества и технология производства изделий на их основе: БНТУ, учебное пособие под ред. М.Ф. Мурашко. 2003. 217 с.
- Лесовик В.С., Шахова Л.Д., Кучеров Д.Е., Аксютин Ю.С. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих

с учетом генезиса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 10–14.

3. Бархатов В.И., Добровольский И.П., Капкаев Ю.Ш. Отходы производств и потребления - резерв строительных материалов: монография, Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2017. 477 с.

4. Жерновой Ф.Е., Мирошников Е.В. Комплексная оценка факторов повышения прочности цементного камня добавками ультрадисперсного перлита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. №2. С. 55–60.

5. Онацкий С.П. Производство керамзита. М.: Стройиздат, 1971. 312 с.

6. Князева С.А., Яковлев Г.И., Харченко И.Я., Саидова З.С., Александров А.М., Пудов И.А., Стивенс А.Э., Бабаев А.И., Семёнова С.Н. Геополимерное вяжущее на основе керамзитовой пыли для инъекционных смесей в геотехническом строительстве // Строительные материалы. 2021. №5. С. 63–68. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-63-68.

7. Князева С.А., Яковлев Г.И., Харченко А.И. Геополимерная композиция на основе керамзитовой пыли для геотехнического строительства // Строительные материалы. 2021. №12. С. 69–72

8. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.

9. Потапова Е.Н., Манушина А.С., Зырянов М.С., Урбанов А.В. Методы определения

пуццолановой активности минеральных добавок // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2017. №7-8. С. 29–33.

10. Жерновой Ф.Е., Мирошников Е.В. Комплексная оценка факторов повышения прочности цементного камня добавками ультрадисперсного перлита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. №2. С. 55–60.

11. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры минералов. М.: Издательство Московского университета, 1976. 175 с.

12. Зинюк Р.Ю., Балыков А.Г., Гавриленко И.Б., Шевяков А.М. ИК-спектроскопия в неорганической технологии. Л.: Химия, 1983. 160 с.

13. Маслова М.Д., Белоухов С.Л., Тимохина Е.С., Шнее Т.В., Нефедьева Е.Э., Шайхиев И.Г. Термохимические характеристики глинистых минералов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17. №21. С. 121–127.

14. Рахимов Р.З., Рахимов Н.Р., Гайфуллин А.Р. Дегидратация глин различного минерального состава при прокаливании // Известия КГАСУ. 2016. №4. С. 388–394.

15. Шаяхмтов А.У., Мустафин А.Г., Массалимов И.А. Особенности термического разложения оксида, пероксида, гидроксида и карбоната кальция // Вестник Башкирского университета. 2011. Т.16. №1. С. 29–32.

Информация об авторах

Князева Светлана Анатольевна, аспирант кафедры строительных материалов, механизации и геотехники. E-mail: SvetikSm_Knyazeva@mail.ru. Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова. Россия, 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7.

Яковлев Григорий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов, механизации и геотехники. E-mail: gyakov@istu.ru. Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова. Россия, 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7.

Бурьянов Александр Фёдорович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: rga-service@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Жуков Алексей Николаевич, аспирант кафедры строительных материалов, механизации и геотехники. E-mail: alexej.zhukov7@gmail.com. Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова. Россия, 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7.

Киршин Игорь Алексеевич, бакалавр кафедры строительных материалов, механизации и геотехники. E-mail: igorkirshin@yandex.ru. Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова. Россия, 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7.

Поступила 21.12.2023 г.

© Князева С.А., Яковлев Г.И., Бурьянов А.Ф., Жуков А.Н., Киршин И.А., 2024

^{1,*}Knyazeva S.A., ¹Yakovlev G.I., ²Buryanov A.F., ¹Zhukov A.N., ¹Kirshin I.A.

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University

²National Research Moscow State University of Civil Engineering

*E-mail: SvetikSm_Knyazeva@mail.ru

RESEARCH OF THE BINDER SYSTEM STRUCTURE BASED ON THERMAL ACTIVATED EXPANDED CLAY DUST

Abstract. The production of Portland cement is associated with a high consumption of mineral raw materials and significant emissions of carbon dioxide into the atmosphere. Therefore, the partial replacement of cement with technogenic mineral additive in cement compositions is a rational way of utilizing production waste. Besides, the use of industrial waste products as mineral additives allows solving environment problems and reducing the consumption of primary natural resources.

This paper presents the study on the hydraulic activity of thermally activated expanded clay dust used as an active mineral additive in cement compositions. Expanded clay dust is an industrial waste formed during the production of ceramsite gravel, and captured in the dust cleaning systems of kilns: dust chambers, cyclones, filters.

A comprehensive study of the composition, containing expanded clay dust and water, was carried out using the IR spectral analysis, differential scanning calorimetry and scanning electron microscopy with X-ray microanalysis.

It was established that the strength of baked samples increased by 80 % after immersion in water. The main hydration products of baked expanded clay dust are three types of compounds - fibrous crystals of calcium hydrosulfoaluminate, calcium hydroaluminates in the form of cruciform twins, amorphized spherulite-like formations based on low-base calcium silicate hydrates.

Keywords: expanded clay dust, mineral additive, thermal activate, Portland cement, utilization of industrial waste.

REFERENCES

1. Kuz'menkov M.I., Kunickaya T.S. Binders and production technology of products based on them [Vyazhushchie veshchestva i tekhnologiya proizvodstva izdelij na ikh osnove]. Minsk: BNTU, 2003. 217 p. (rus)
2. Lesovik V.S., Shakhova L.D., Kucherov D.E., Aksyutin YU.S. Classification of active mineral additives for composite binders, taking into account the genesis [Klassifikaciya aktivnykh mineral'nykh dobavok dlya kompozicionnykh vyazhushchikh s uchetom genezisa]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No.3. Pp. 10–14. (rus)
3. Barhatov V.I., Dobrovolskij I.P., Kapkaev YU.SH. Production and consumption waste - reserve of building materials [Othody proizvodstv i potrebleniya - rezerv stroitel'nykh materialov]. Chelyabinsk: Izd-vo Chelyab. gos. un-ta, 2017. 477 p. (rus)
4. Zhernovoj F.E., Miroshnikov E.V. Comprehensive assessment of factors for increasing the strength of cement stone with additives of ultrafine perlite [Kompleksnaya ocenka faktorov povysheniya prochnosti cementnogo kamnya dobavkami ul'tradispersnogo perlita]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009.No.2. Pp. 55–60. (rus)
5. Onatsky S.P. Production of expanded clay [Proizvodstvo keramzita]. Moscow: Strojizdat, 1971. 312 p. (rus)
6. Knyazeva S.A., Yakovlev G.I., Kharchenko I.Ya., Saidova Z.S., Aleksandrov A.M., Pudov I.A., Stivens A.E., Babaev A.I., Semenova S.N. Geopolymer Binder on the Basis of expanded clay dust for injection mixtures in geotechnical construction [Geopolimernoe vyazhushchee na osnove keramzitovoj pyli dlya in'ekcionnykh smesey v geotekhnicheskom stroitel'stve]. Stroitel'nye Materialy. 2021. No. 5. Pp. 63–68. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-63-68. (rus)
7. Knyazeva S.A., Yakovlev G.I., Kharchenko A.I. Geopolymer composition on the basis of expanded clay dust for geotechnical construction [Geopolimernaya kompoziciya na osnove keramzitovoj pyli dlya geotekhnicheskogo stroitel'stva]. Stroitel'nye Materialy. 2021. No. 12. Pp. 69–72. (rus)
8. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savel'ev V.G. Methods of physico-chemical analysis of binders [Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv]. Moscow: Vysshaya shkola, 1981. 335 p. (rus)
9. Potapova E.N., Manushina A.S., Zyryanov M.S., Urbanov A.V. Methods for determining the pozzolan activity of mineral additives [Metody opredeleniya puccolanovoj aktivnosti mineral'nykh dobavok]. Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka. 2017. No. 7-8. Pp. 29–33. (rus)
10. Zhernovoi F.E., Miroshnikov E.V. Comprehensive assessment of factors for increasing the strength of cement stone with additives of ultrafine perlite [Kompleksnaya ocenka faktorov povysheniya prochnosti cementnogo kamnya dobavkami

ul'tradispersnogo perlita]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No 2. Pp. 55–60. (rus)

11. Plyusnina I.I. Infrared spectra of minerals [Infrakrasnye spektry mineralov]. Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 1976. 175 p. (rus)

12. Zinyuk R.YU., Balykov A.G., Gavrilenko I.B., Shevyakov A.M. IR-spectroscopy in non-organic technology [ИК-спектроскопия в неорганической технологии]. Leningrad: Himiya, 1983. 160 p. (rus)

13. Maslova M.D., Belopuhov S.L., Timohina E.S., SHnee T.V., Nefed'eva E.E., Shajhiev I.G. Thermochemical characteristics of clay minerals

[Termokhimicheskie kharakteristiki glinistykh mineralov]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. T.17. No. 21. Pp. 121–127. (rus)

14. Rahimov R.Z., Rahimov N.R., Gajfullin A.R. Dehydration of clays of different mineral composition during calcinations [Degidrataciya glin razlichnogo mineral'nogo sostava pri prokalivanii]. Izvestiya KGASU. 2016. No 4. Pp. 388–394. (rus)

15. Shayahmtov A.U., Mustafin A.G., Massalimov I.A. Particularity of thermal decomposition of calcium oxide, peroxide, hydroxide and carbonate [Osobennosti termicheskogo razlozheniya oksida, peroksida, gidroksida i karbonata kal'ciya]. Bulletin of Bashkirskogo universiteta. 2011. Vol. 16. No. 1. Pp. 29–32. (rus)

Information about the authors

Knyazeva, Svetlana A. Postgraduate student. E-mail: SvetikSm_Knyazeva@mail.ru. Kalashnikov Izhevsk State Technical University. Russia, 426069, Izhevsk, st. Studencheskaya, 7.

Yakovlev, Grigorii I. DSc, Professor. E-mail: gyakov@istu.ru. Kalashnikov Izhevsk State Technical University. Russia, 426069, Izhevsk, st. Studencheskaya, 7.

Buryanov, Aleksandr F. DSc, Professor. E-mail: rga-service@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe Highway, 26.

Zhukov, Aleksej N. Postgraduate student. E-mail: alexej.zhukov7@gmail.com. Kalashnikov Izhevsk State Technical University. Russia, 426069, Izhevsk, st. Studencheskaya, 7.

Kirshin, Igor'A. Bachelor student. E-mail: igorkirshin@yandex.ru. Kalashnikov Izhevsk State Technical University. Russia, 426069, Izhevsk, st. Studencheskaya, 7.

Received 21.12.2023

Для цитирования:

Князева С.А., Яковлев Г.И., Бурьянов А.Ф., Жуков А.Н., Киршин И.А. Исследование структурообразования вяжущей системы на основе термически активированной керамзитовой пыли // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №1. С. 21–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-21-29

For citation:

Knyazeva S.A., Yakovlev G.I., Buryanov A.F., Zhukov A.N., Kirshin I.A. Research of the binder system structure based on thermal activated expanded clay dust. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 1. Pp. 21–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-21-29