

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-23-30

Саламанова М.Ш.

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика
Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук
E-mail: madina_salamanova@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ АКТИВНОГО МИКРОКРЕМНЕЗЕМА НА СВОЙСТВА ВЯЖУЩИХ ЩЕЛОЧНОЙ АКТИВАЦИИ

Аннотация. Мировой опыт промышленного внедрения и уникальность свойств строительных щелочных композитов доказывают перспективность и актуальность развития бесклинкерной технологии. Разработка рецептур вяжущих связок щелочной активации на основе тонкодисперсных порошков алюмосиликатной природы позволит получать новые эффективные и качественные продукты. В работе исследовано влияние активного микрокремнезема на кинетику набора прочности, изменение плотности и порового пространства цементного камня, рецептурно-технологических факторов и условий твердения. Обоснованы химические превращения активного кремнезема в условиях щелочной среды, приводящие к изменениям водородного показателя. Методами электронной микроскопии развиты основы формирования структуры цементного камня на вяжущей связке «аспирационная пыль (60 %) – клинкерная пыль (40 %) – микрокремнезем – Na_2SiO_3 », фазовый состав характеризуется присутствием гидроалюмосиликатов натрия и кальция, кристаллических новообразований близких к ларниту и их гидратов, аморфной субстанции, сульфалюминатов кальция, гидроалюминатов кальция. Результаты исследований, на наш взгляд, безусловно представляют практическую значимость для строительной отрасли, так как предлагаемые рецептуры бесклинкерных цементов способны частично заменить дорогой и энергоемкий портландцемент, позволяя создавать прочные и долговечные бетонные и железобетонные конструкции.

Ключевые слова: бесклинкерные вяжущие, аспирационная пыль, клинкерная пыль щелочной активатор, метасиликат натрия, микрокремнезем

Введение. Производство портландцемента на мировом уровне в 2020 году достигло 4,1 млрд. тонн, и оно стремительно растет из года в год за счет развивающихся стран. Один только Китай в 2018 году произвел 2 370 млн. тонн или 57,6 % от мирового объема. Высокие показатели, а также высокие темпы роста производства демонстрируют Турция, Вьетнам и Индонезия, которые скорее всего в ближайшие 5 лет обойдут США.

Конечно, с одной стороны, это положительная тенденция, но, с другой возрастают объемы, выделяющегося при производстве цемента, углекислого газа. Установлено, что при обжиге 1 тонны портландцементного клинкера образуется 0,37 тонны углекислого газа в результате диссоциации карбоната кальция; в тоже время вырабатывается еще дополнительная порция около 0,35 тонн CO_2 при сжигании топлива и других технологических переделов. Мировая цементная промышленность занимает одно из лидирующих мест после электроэнергетики и транспорта по образованию парниковых газов (5–8 %). Расходуется огромное количество углекислоты, которое в течение миллиардов лет консервировалось в горных породах и минералах различного генезиса, что в итоге сказывается на экологической обстановке тропосферы [1–10, 15]. Поэтому ос-

новной проблемой исследователей является снижение выделяющейся углекислоты, которая образуется при производстве портландцемента.

Таким образом, чтобы предотвратить вредные выбросы в атмосферу и не навредить природной среде и человечеству, необходимо развивать новые перспективные направления решения обозначенных проблем, в том числе такие как разработка технологии бесклинкерных вяжущих щелочной активации (БВЩА), которые можно производить как на основе отходов топливно-энергетической промышленности при их наличии в конкретном регионе, так и с применением тонкодисперсных алюмосиликатных добавок техногенного или естественного генезиса.

Материалы и методы. В качестве минеральных добавок для разработки рецептур БВЩА исследовались отходы цементной промышленности, собранные из пылеочистных сооружений клинкерообжигательных вращающихся печей. Энергодисперсионный микроанализ исследуемых добавок проводили с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 3D 200 i, который показал следующий оксидный состав:

– клинкерная пыль, %: $\text{MgO} = 1,49$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,11$; $\text{SiO}_2 = 16,89$; $\text{K}_2\text{O} = 1,57$; $\text{CaO} = 71,64$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4,30$.

– аспирационная пыль, %: $MgO = 0,97$; $Al_2O_3 = 4,68$; $SiO_2 = 20,31$; $K_2O = 6,43$; $CaO = 64,15$; $Fe_2O_3 = 3,47$.

Изучение физико-механических свойств цементного камня проводили по стандартным методикам ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. ГОСТ 12730.1-78 Бетоны. Методы определения плотности; испытание образцов осуществляли с помощью гидравлического пресса ИП-500. Для создания соответствующих условий хранения образцов были использованы: камеры пропарочная КУП -1 и нормального твердения КНТ-1.

В результате проведения исследований получены эффективные рецептуры вяжущих связок «аспираторная пыль (60 %) – клинкерная пыль (40 %) – микрокремнезем – Na_2SiO_3 », с использованием аспираторной ($S_{уд} = 280 \text{ м}^2/\text{кг}$) и клинкерной пыли ($S_{уд} = 210 \text{ м}^2/\text{кг}$) электрофильтров вращающихся печей, микрокремнезема ($S_{уд} = 1620 \text{ м}^2/\text{кг}$) Челябинского металлургического комбината, жидкого натриевого стекла с силикатным модулем 2,4 и плотностью $1,42 \text{ г}/\text{см}^3$. Следует отметить, что оптимальная дозировка

добавки активного микрокремнезема (МК) определялась экспериментальным путем, особенность МК заключается в том, что ультрадисперсные микросферы аморфизированного стекла с содержанием $SiO_2 = 98 \%$ и размерностью до $0,1 - 0,2 \text{ мкм}$, покрывают частицы составляющих вяжущей связки и заполнителя, создают пластифицирующий и уплотняющий эффекты, заполняя межзерновое пространство прочными новообразованиями и повышая адгезионную прочность [16].

Основная часть. Исследовалось влияние содержания добавки МК на прочность цементного камня на вяжущих связках «аспираторная пыль (60 %)– клинкерная пыль (40 %) – микрокремнезем – Na_2SiO_3 » в 28 суточном возрасте в зависимости от условий выдерживания; часть образцов после предварительного выдерживания в течение 10 часов подвергалась тепловлажностной обработке (ТВО) по режиму 3+4+2 при температуре изотермической выдержки $80 \text{ }^\circ\text{C}$, часть твердела в нормально-влажностных условиях (НВУ), на рисунке 1 приведены результаты испытаний.

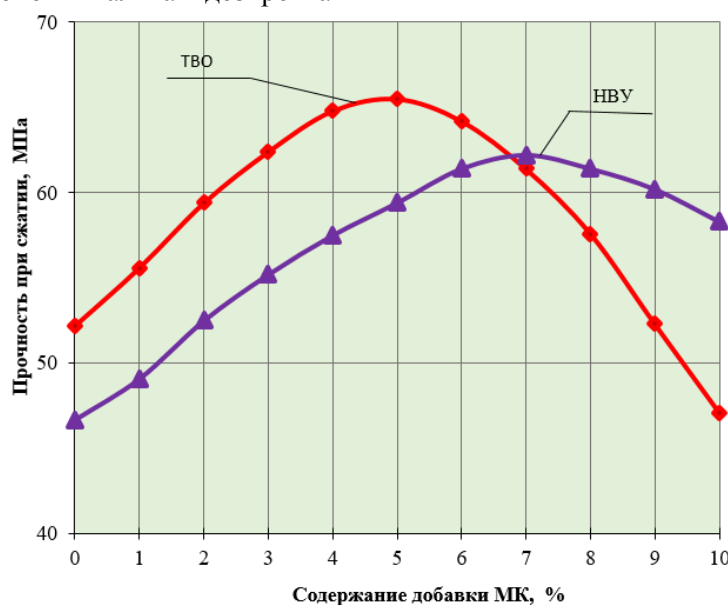


Рис. 1. Зависимость влияния содержания микрокремнезема на прочность цементного камня после ТВО и НВУ

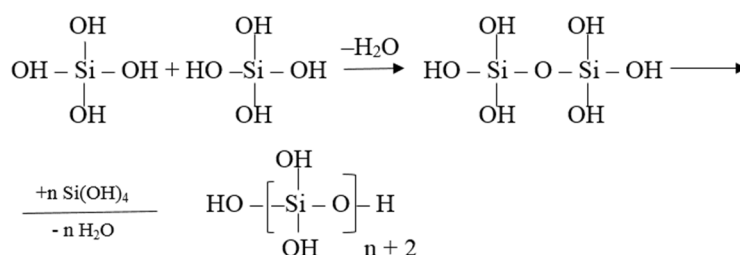
Введение добавки микрокремнезема по-разному отразилось на свойствах цементного камня на основе вяжущей связки из следующих компонентов «аспираторная пыль (60 %) – клинкерная пыль (40 %) – микрокремнезем – Na_2SiO_3 », тепловлажностная обработка благоприятна для набора прочности, при содержании добавки МК 5 % прочность увеличилась на 25,4 % и составила 65,7 МПа; твердение в нормально-влажностных условиях немного по-другому действует на прочность цементного камня, введение МК в дозировке 7 % способствовало достижению максимальной прочности 62,2 МПа,

что на 33,1 % повысило прочность в сравнении с контрольным образцом. Добавка микрокремнезема обладает упрочняющим действием, при дозировке 5 % в условия ТВО, и 7% при твердении в НВУ; после предварительной выдержки температура считается катализатором набора прочности.

Полученные результаты показали, что добавка МК – это активная минеральная добавка, обладающая пластифицирующим эффектом; высокая удельная поверхность частиц ферросилиция заполняет межзерновое пространство цементного камня, уплотняя его; связывает оксиды

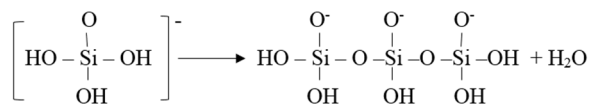
кальция и натрия с образованием трудно растворимых соединений типа гидросиликатов кальция и натрия; повышает растворимость аспирационной и клинкерной пыли.

Эффективность микрокремнезема проявляется только в определенных границах присутствия в составе системы и зависит от условий твердения образцов вяжущего, при твердении после ТВО этот диапазон 4–6 %, при НВУ выдерживания 6–8 %. В обоих случаях наблюдается равномерное снижение прочности при увеличении дозировки микрокремнезема выше обозначенных. Обоснованию этому служат химические превращения активного кремнезема в условиях высокого содержания этого вещества, приводящего к изменениям водородного показателя



Гель кремниевой кислоты имеет несколько ионизированных форм, которые изменяются в зависимости от pH среды, так если $\text{pH} < 8$ образуется H_4SiO_4 , при $\text{pH} = 11,5$ – SiO_4^{4-} [13, 14, 22, 23].

Реакция полимеризации мономерного аниона H_3SiO_4^- протекает в очень короткие сроки:



Микрокремнезем как было установлено является активной добавкой, состоящей на 96–98 % из аморфной составляющей, при увеличении дозировки поровое пространство твердеющей системы насыщается значительным количеством кремниевой кислоты, что приводит к снижению pH среды из-за кислотного оксида SiO_2 , в результате начинается поликонденсация ионов $\text{Si}(\text{OH})_6$ и поры и капилляры цементного камня заняты слабо связанными коллоидным гелем из обводненного SiO_2 и именно это ухудшает свойства вяжущей связки при высоких дозировках МК. Визуально даже цвет образцов с высоким содержанием микрокремнезема изменяется, становясь сероватым.

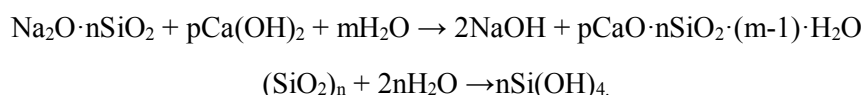
В случае если дозировка добавки МК ниже рекомендуемой межзерновое пространство со-

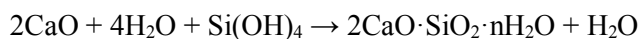
среды. Высокая щелочность среды системы вызывает быстрое диспергирование порошкообразных компонентов, и микрокремнезема в частности, а процессы протекающие в композиции можно описать уравнением: $(\text{SiO}_2)_n + 2n\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow n\text{Si}(\text{OH})_4$.

В зависимости от водородного показателя среды диспергация кремнезема изменяется, при $\text{pH} < 8$ растворимость микрокремнезема – $2 \cdot 10^{-3}$ моль/л, а при $\text{pH} = 11$ она существенно увеличивается $50 \cdot 10^{-3}$ моль/л, и происходит это за счет выпадения в осадок нестабильной ортокремниевой кислоты $\text{Si}(\text{OH})_4$ и ионов $(\text{Si}(\text{OH})_6)^{2-}$. В результате преобразований при изменениях щелочности среды проходят цепные реакции поликонденсации, приводящие к сшиванию цепочек и образованию поликремниевой кислоты [17 – 21].

держит небольшое количество кремниевой кислоты, и это не особо влияет на pH среды, в результате реакций полимеризации не наблюдается, вяжущая система твердеет, образуя прочную структуру. При повышении дозировки МК в поровом пространстве увеличивается присутствие кремнезема SiO_2 , что способствует росту температуры в твердеющей системе, поэтому при ТВО количество добавки требуется меньшее, чем при НВУ.

Реакционная способность аспирационной пыли определяется как было установлено не только наличием стеклофазы и значением pH щелочной среды, но присутствием активных минеральных добавок, вступающих во взаимодействие с продуктами растворения аспирационных минералов с образованием в результате кристаллического сростка цементного камня. Добавка микрокремнезема и относится к такому типу веществам, она оказывает сильное воздействие на деструкцию алюмокремнекислородных цепочек и связывает их в результате $2\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}$ катионного обмена, оказывая стимулирующее действие. Также аморфная модификация кремнезема способна диспергироваться в растворе NaOH с образованием $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ силикатов натрия и сложных труднорастворимых соединений типа низкоосновных силикатов кальция:





Следовательно, повышение прочности в первые сроки твердения обусловлено именно физическим взаимодействием высокодисперсных частичек и их поверхностной энергии. На рисунке 2 приводятся результаты исследования

влияния добавки микрокремнезема на свойства модифицированного цементного камня: водонасыщение и плотность.

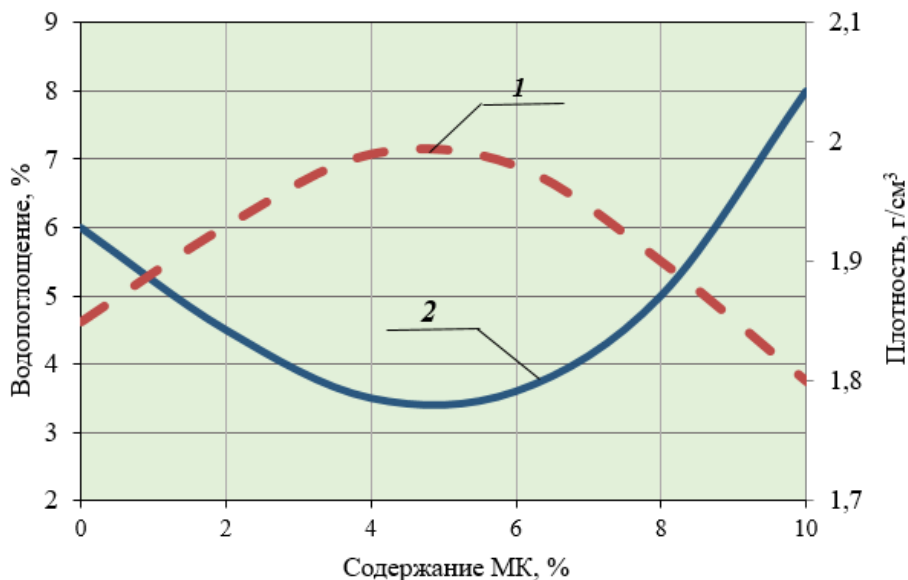


Рис. 2. Зависимости влияния МК на плотность (1) и водопоглощение (2) цементного камня после ТВО

Введение добавки МК в дозировке 5% снижает потребность в щелочном растворе, тем самым повышается плотность цементного камня после ТВО с 1,8 до 2,0 г/см³, водонасыщение уменьшается с 6,0 до 3,5%.

Для изучения процессов структурообразования цементного камня БВЦА проводились электронно-зондовые исследования на растровом

электронном микроскопе VEGA II LMU производства фирмы Tescan, системы энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT. Композиция на вяжущей связке «аспирационная пыль (60%) – клинкерная пыль (40%) – микрокремнезем (5%) – Na₂SiO₃» характеризуется массивной неоднородной структурой (рис. 3).

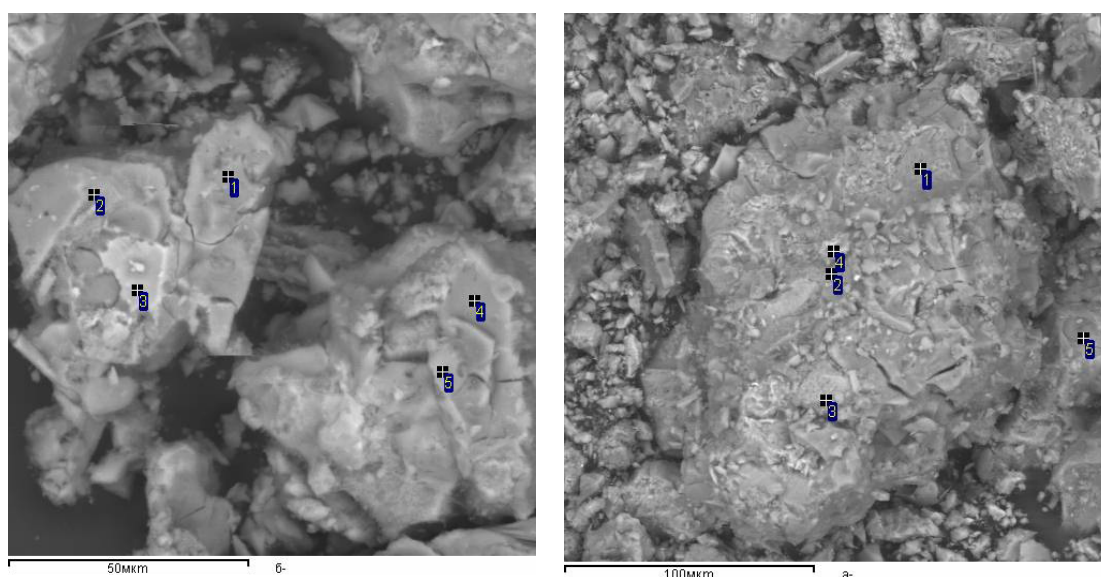


Рис. 3. Типичные агрегаты кристаллов кальциевых силикатов

В полостях, микротрещинах и межкристаллических пространствах развиты игольчатые

кристаллы (длиной до 200–300 мкм) сульфоломинатов, иногда срастающиеся в «войлочные»

агрегаты; в ассоциации присутствует тонковолокнистый гипс, пластинчатые кристаллы гидроалюминатов кальция. Химический состав варьирует в агрегатах с разными структурно-текстурными особенностями (таблица 1): присутствуют массивные скрытокристаллические агрегаты

алюмосиликатного состава (видимо, «наследующие» агрегаты исходной глинистой массы) и слагающие основную массу, раскристаллизованные трещиноватые агрегаты, сложенные гидратированными кальциевыми силикатам.

Таблица 1

**Результаты анализа агрегата кристаллов кальциевых силикатов
(участки анализа указаны на рисунке 3)**

спектр	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO	Итог
1	–	–	2,68	9,45	–	64,97	8,94	85,90
2	–	–	1,80	11,56	–	55,05	16,66	85,00
3	0,58	1,15	3,73	25,47	–	60,10	2,99	94,00
4	0,54	0,51	3,09	22,07	0,48	56,82	6,16	89,60
5	-	1,82	2,50	31,94	–	53,31	1,77	91,20

Изучение процессов твердения и формирования структуры цементного камня на основе вяжущих щелочного затворения выявило схожесть их с гидратационными реакциями взаимодействия известково-кремнеземистых композиций [16–23]. Щелочи реагируют с диоксидом кремния по следующей схеме: в процессе кристаллизации гидроксид натрия, теряя влагу и образует кристаллогидраты, обволакивая зерна заполнителя, далее взаимодействует с углекислым газом по реакции: $2\text{NaOH} + \text{CO}_2 = \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, параллельно связывает диоксид кремния по реакции: $2\text{NaOH} + n\text{SiO}_2 = \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, в результате чего формируется связка щелочных гидросиликатов натрия или калия.

Выводы.

Анализ полученных результатов исследования подтвердил перспективность бесклинкерной технологии, вяжущие связки щелочного затворения позволят получать строительные композиты с заданными свойствами, не уступающими портландцементному бетону. Добавка активного микрокремнезема при дозировке 5–7 % создает благоприятные условия для получения прочного и долговечного искусственного камня. Электронно-зондовые исследования процессов структурообразования цементного камня на связках «аспирационная пыль (60 %)– клинкерная пыль (40 %)– микрокремнезем (5 %)– Na₂SiO₃» подтвердили присутствие агрегатов гидроалюмосиликатного состава, кристаллических новообразований близких к ларниту и их гидратов, аморфной субстанции, развитых игольчатых кристаллов сульфалюминатов кальция, иногда срастающихся в «войлочные» агрегаты; пластинчатых кристаллов гидроалюминатов кальция.

Таким образом, полученные разработки внесут свой вклад в строительное материаловедение создавая новые композиты с меньшими энерго- и

ресурсозатратами и одновременно улучшая экологическую обстановку окружающей нас среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Lopez F.J., Sugita S., Tagaya M., Kobayashi T. Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. 2014. № 2. Pp. 16–27.
- Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Возможные пути альтернативного решения проблем в цементной индустрии // Строительные материалы. 2020. № 1-2. С. 73–77.
- Chen L., Wang Z., Wang Y. and Feng J. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin- Based Geopolymer // Materials. 2016. Vol. 9. 767.
- Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Исмаилова З.Х. Влияние активных центров поверхности на реакционную способность минеральных добавок // Научный журнал «Современная наука и инновации» (Ставрополь – Пятигорск). 2017. №2 (18). С. 168–175.
- Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. 2018. №2 (Т.46). С. 65–70.
- Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M.Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 23–27 September 2019. Belgorod. 2019. Pp. 385-388.
- Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang H. Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture // Cement and Concrete Research. 2016. Pp. 163–173.

8. Рахимова Н.Р. Состояние и перспективные направления развития исследований и производства композиционных шлакощелочных вяжущих, растворов и бетонов // Строительные материалы. 2008. №9. С.77–80.
9. Hardjito D., Wallah S., Sumajouw D., Rangan B. On the development of fly ash-based geopolymer concrete // ACJ Materials Journal. 2004. Vol.101. Pp. 467–472.
10. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008. 592 pp.
11. Fadhil Nuruddin M., Demie S., Fareed Ahmed M., Nasir Shafiq Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011. № 75. Pp. 908–914.
12. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Композиционные шлакощелочные вяжущие с минеральными добавками различного типа активности // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2013. № 16. С. 204 – 216.
13. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Pp. 2084 – 2090.
14. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere // International Journal of Mineral Processing. 2013. Vol. 216. Pp. 102 –107.
15. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. Pp.500 – 503.
16. Bataev D.K-S., S-A. Yu. Murtazayev, Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 457–460.
17. Рахимов М.М., Хабибуллина Н.Р., Рахимов Р.З. Механизм отверждения боратных солевых растворов шлакощелочными вяжущими // Цемент и его применение. 2016. № 3. С. 96–99.
18. Dombrowski K. The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers // Journal of Materials Science. Vol. 42. №. 9. 2007. Pp. 3033–3043.
19. Pawlasova S., F. Skvara High-Temperature Properties of Geopolymer Materials // Alkali Activated Materials. 2008. Pp. 523–525.
20. Khater H.M. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT // Advances in Nano Research. 2015. Vol. 3. №. 4. Pp. 225–242.
21. Khater H.M., El Nagar A.M., Ezzat M. Optimization of Alkali Activated Grog/Ceramic Wastes Geopolymer Bricks // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2016. Vol. 5. Issue 1. Pp. 37–46.
22. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand // Int. J. Chem. Sci. 2016. № 14(Vol.1). Pp. 115–126.
23. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р., Исмаилова З.Х. Закономерности протекания процессов формирования структуры и прочности бесклинкерного вяжущего щелочной активации// Международный научно-исследовательский журнал «Строительные материалы и изделия». 2020. Т.3. №1. С. 21–29.

Информация об авторах

Саламанова Мадина Шахидовна, кандидат технических наук, доцент, директор научно-технического центра коллективного пользования «Современные строительные материалы и технологии». E-mail: madina_salamanova@mail.ru. Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова. Россия, 364051, Грозный, пр. Исаева, 100.

Поступила 25.09.2021 г.

© Саламанова М.Ш., 2022

Salamanova M.Sh.

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov

Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences

E-mail: madina_salamanova@mail.ru

THE INFLUENCE OF ACTIVE MICROSILICA ADDITIVE ON BINDING PROPERTIES OF ALKALINE ACTIVATION

Abstract. *The world experience of implementation and the uniqueness of building alkaline composites prove the prospects and relevance of the development of clinker-free technology. The development of formulations of alkaline activation binders based on fine powders of aluminosilicate nature will allow obtaining new effective and high-quality products. The paper investigates the effect of active microsilica on the kinetics of strength gain, changes in density and pore space of cement stone, formulation and technological factors and hardening conditions. The chemical transformations of active silica under alkaline conditions, leading to changes in the pH value, have been substantiated. By electron microscopy, the foundations of the formation of the structure of a cement stone on a binding bond "aspiration dust (60 %) – clinker dust (40 %) – microsilica – Na_2SiO_3 " amorphous substance, calcium sulfoaluminates, calcium hydroaluminates are developed. According to authors, the research results are important for the construction industry, since the proposed formulations of clinker-free cements can replace expensive and energy-intensive Portland cement, making it possible to create strong and durable concrete and reinforced concrete structures.*

Keywords: *clinker-free binders, aspiration dust, clinker dust, alkaline activator, sodium metasilicate, silica fume*

REFERENCES

1. Lopez F.J., Sugita S., Tagaya M., Kobayashi T. Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2014. No. 2. Pp. 16 – 27.
2. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Nahaev M.R. Possible ways of alternative solutions to problems in the cement industry [Vozmozhnye puti al'ternativnogo resheniya problem v cementnoj industrii]. *Construction Materials*. 2020. No. 1-2. Pp. 73–77. (rus)
3. Chen L., Wang Z., Wang Y. and Feng J. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer. *Materials*. 2016. Vol. 9. 767.
4. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Ismailova Z.Kh. Influence of active centers of the surface on the reactivity of mineral additives [Vliyanie aktivnykh centrov poverhnosti na reakcionnyuyu sposobnost' mineral'nykh dobavok]. *Scientific journal "Modern Science and Innovations" (Stavropol - Pyatigorsk)*. 2017. No. 2 (18). Pp. 168–175. (rus)
5. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh. Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature [Perspektivy ispol'zovaniya termoaktivirovannogo syr'ya al'yumosilikatnoj prirody]. *Privolzhsky scientific journal*. 2018. No.2 (Vol.46). Pp. 65–70. (rus)
6. Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M.Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing. 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 23–27 September 2019. Belgorod. 2019. Pp. 385–388.
7. Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang H. Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture. *Cement and Concrete Research*. 2016. Pp. 163–173.
8. Rakhimova N.R. State and promising directions of development of research and production of composite slag-alkaline binders, mortars and concretes [Sostoyanie i perspektivnye napravleniya razvitiya issledovaniy i proizvodstva kompozitsionnykh shlakoshchelochnykh vyazhushchih, rastvorov i betonov] *Construction Materials*. 2008. No.9. Pp. 77–80. (rus)
9. Hardjito D., Wallah S., Sumajouw D., Rangan B. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACJ Materials Journal*. 2004. Vol.101. Pp. 467–472.
10. Davidovitz J. *Geopolymer. Chemistry and applications*. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008. 592 p.
11. Fadhil Nuruddin M., Demie S., Fareed Ahmed M., Nasir Shafiq Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2011. No 75. Pp. 908–914.
12. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Composite slag-alkali binders with mineral additives of various types of activity [Kompozitsionnye shlakoshchelochnye vyazhushchie s mineral'nymi dobavkami razlichnogo tipa aktivnosti]. *Bulletin of the Volga*

Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. 2013. No.16. Pp. 204–216. (rus)

13. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. Pp. 2084–2090.

14. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere. *International Journal of Mineral Processing*. 2013. Vol. 216. Pp. 102–107.

15. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaev M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST)*. April 2019. Vol.1. Pp. 500–503.

16. Bataev D.K-S., S- A. Yu. Murtazayev, Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST)*. April 2019. Vol.1. Pp. 457–460.

17. Rakhimov M.M., Khabibullina N.R., Rakhimov R.Z. Curing mechanism of borate salt so-

lutions with slag-alkaline binders [Mekhanizm otverzhdeniya boratnyh solevykh rastvorov shlakoshchelochnymi vyazhushchimi]. *Cement and its application*. 2016. No.3. Pp. 96 – 99. (rus)

18. Dombrowski K. The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers. *Journal of Materials Science*. Vol. 42. No. 9. 2007. Pp. 3033 – 3043.

19. Pawlasova S., F. Skvara High-Temperature Properties of Geopolymer Materials. *Akali Activated Materials*. 2008. Pp. 523 – 525.

20. Khater H.M. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT. *Advances in Nano Research*. 2015. Vol. 3. No. 4. Pp. 225 – 242.

21. Khater H.M., El Nagar A.M., Ezzat M. Optimization of Alkali Activated Grog/Ceramic Wastes Geopolymer Bricks. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2016. Vol. 5. Issue 1. Pp. 37– 46.

22. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand. *Int. J. Chem. Sci*. 2016. No 14 (Vol. 1). Pp. 115 – 126.

23. Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R., Ismailova Z.Kh. Regularities of the processes of formation of the structure and strength of the linker-free binder alkaline activation [Zakonomernosti protekaniya processov formirovaniya struktury i prochnosti besklinkernogo vyazhushchego shchelochnoj aktivacii]. *International research journal "Building materials and products"*. 2020. Vol.3. No.1. Pp. 21–29. (rus)

Information about the authors

Salamanova, Madina S. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Technical Center for Collective Use "Modern Building Materials and Technologies". E-mail: madina_salamanova@mail.ru. Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikova. Russia, 364051, Grozny, Isaeva Ave., 100.

Received 25.09.2021

Для цитирования:

Саламанова М.Ш. Исследование влияния добавки активного микрокремнезема на свойства вяжущих щелочной активации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 23–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-23-30

For citation:

Salamanova M.Sh. The influence of active microsilica additive on binding properties of alkaline activation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 1. Pp. 23–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-23-30