

УДК 666.9

Рахимова Наиля Равилевна

доктор технических наук, профессор

Email: rahimova.07@list.ru

Рахимов Равиль Зуфарович

доктор технических наук, профессор

Email: rahimov11@bk.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Влияние содержания добавок термоактивированной глины на свойства и состав продуктов твердения композиционного шлакощелочного вяжущего с низким содержанием щелочного активатора

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – изучение особенностей свойство- и структурообразования композиционного шлакощелочного вяжущего с добавками термоактивированных глин в зависимости от содержания и состава аморфной фазы и низким содержанием щелочного активатора (4 М NaOH).

Результаты. Методами рентгенофазового анализа установлено, что основными продуктами твердения композиционного шлакощелочного вяжущего являются C-N-(A)-S-H гель, кальцит, цеолиты, фожазит, анальцит. Получено композиционное шлакощелочное вяжущее с добавкой 30 % термоактивированной глины и прочностью при сжатии в возрасте 28 суток до 30 МПа. Установлено, что термоактивированная глина, содержащая 60 % реакционноспособной фазы, пригодна для использования в качестве дополнительного алюмосиликатного компонента к шлаку.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что полученные результаты вносят вклад в развитие теоретических основ, расширение сырьевой базы и номенклатуры бесклинкерных низкообжиговых минеральных вяжущих.

Ключевые слова: шлак, глина, щелочь, вяжущее, термическая активация, прочность.

Для цитирования: Рахимова Н. Р., Рахимов Р. З. Влияние содержания добавок термоактивированной глины на свойства и состав продуктов твердения композиционного шлакощелочного вяжущего с низким содержанием щелочного активатора // Известия КГАСУ. 2021. № 2 (56). С. 50–59. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_50.

1. Введение

Повышение технических и экологических требований к цементам и бетонам, как к наиболее широко применяемым строительным материалам, обуславливает их постоянное развитие. Одним из ведущих направлений их совершенствования является разработка смешанных видов вяжущих, состоящих из двух и более компонентов. Сочетание различных материалов с вяжущими свойствами открывает большие возможности расширения сырьевой базы, решения экологических проблем производства, управления свойство- и структурообразованием как портландцементных, так и бесклинкерных видов вяжущих, к которым относятся и активированные щелочами цементы [1-4]. Благодаря щелочной активации для получения бесклинкерных активированных щелочами цементов возможно использование и совмещение алюмосиликатных материалов широкого химико-минералогического состава с различным содержанием реакционноспособной фазы. Следует отметить, что состав, структура и свойства активированных щелочами цементов зависят от большего числа факторов по сравнению с другими минеральными вяжущими, что связано с необходимостью использования, наряду с минеральным компонентом, щелочного активатора, учетом его природы и концентрации [5-10]. Для смешанных вяжущих систем число факторов, влияющих на состав и свойства искусственных каменных материалов на их основе, возрастает пропорционально числу компонентов и их химико-минералогическому и фазовому составу, содержанию и составу реакционноспособной фазы, тонкости помола и т.д. Одним из эффективных способов

регулирования состава и свойств активированных щелочами цементов, основанном на образовании геля вяжущего смешанного состава C-N-(A)-S-H, является совмещение кальциевых и бескальциевых алюмосиликатных минеральных компонентов. Модифицирование структуры геля обеспечивают возможность регулирования поровой структуры, прочности, термической стойкости и долговечности смешанных вяжущих [11-14]. Одним из наиболее изученных видов смешанных вяжущих такого типа являются активированные щелочами цементы на основе смеси кальциевого и бескальциевого алюмосиликатов – доменного гранулированного шлака и метакатолина, соответственно [14-17]. К перечисленным преимуществам смешанных вяжущих на основе шлака следует отнести и возможность снижения потребности в щелочном компоненте. Что касается метакатолина, то ограниченность запасов каолиновых глин привела в последнее время к интенсивным исследованиям сырьевого потенциала более распространенных некаолиновых и полиминеральных глин для получения активированных щелочами цементов [1, 18-20]. В отличие от шлака, глины гораздо более разнообразны по химико-минералогическому и фазовому составу, поэтому в ранее проведенных исследованиях оптимальное содержание термоактивированных глин в смешанных со шлаком вяжущих системах имело разные значения от 20 до 60 % [8, 16, 17]. В связи с этим целесообразно проведение исследований совместимости шлака и термоактивированных глин с учетом содержания и состава аморфной фазы в последних.

Цель настоящей работы – исследование влияния содержания и состава аморфной фазы термоактивированных глин на механические свойства и состав продуктов реакции композиционных шлакощелочных вяжущих при низком содержании щелочного компонента.

2. Материалы и методы

В исследовании использовались два вида глин месторождений Республики Татарстан и шлак Орско-Халиловского металлургического комбината. Химический состав исходных материалов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исходных материалов

Исходный материал	Содержание (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	другие оксиды	ППП
Глина 1	51,44	33,22	0,65	0,18	0,16	1,18	0,57	1,44	11,16
Глина 2	62,28	25,56	1,11	0,20	0,20	0,59	0,62	1,28	8,16
Шлак	37,49	11,58	0,16	36,22	0,64	0,95	8,61	4,35	-

Удельная поверхность шлака после помола составила 320 м²/кг, глин после обжига и помола – 540 м²/кг. Для активации термоактивированных глин использовались водные растворы 5, 8, 11, 14 М NaOH.

Доменный гранулированный шлак на 97 % состоял из аморфной фазы с незначительным содержанием минералов кристаллической структуры – кальцита CaCO₃ и акерманита Ca₂(Mg_{0.75}Al_{0.25})(Si_{1.75}Al_{0.25}O₇).

Дифрактограммы глин в исходном и термоактивированном состоянии представлены на рис. 1. Минеральный состав глин в исходном состоянии представлен каолинитом Al₂(Si₂O₅)(OH)₄, кварцем SiO₂, мусковитом K_{0.77}Al_{1.93}(Al_{0.5}Si_{3.5})O₁₀(OH)₂. Монтмориллониты состава Ca_{0.2}(Al,Mg)₂Si₄O₁₀(OH)₂·xH₂O и Na,Ca_{0.3}Al₂(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂·xH₂O также были обнаружены в глинах 1 и 2, соответственно. В обеих глинах также обнаружены следы доломита Ca(Ca_{0.17}Mg_{0.83})(CO₃) и шабазита Ca_{1.36}Sr_{0.3}Al_{3.8}Si_{8.3}O₂₄(H₂O)_{7.68}. Термическая обработка глин при 800°C привела к исчезновению пиков, относящихся к глинистым минералам, что свидетельствует об их аморфизации. На рис. 2 приведены результаты термического анализа. Эндотермические пики при 50°C соответствуют потере адсорбционной воды, при 440-540 – дегидроксилированию каолинита и в диапазоне 700-850°C – дегидроксилированию монтмориллонита. Общие потери масс у глин 1 и 2 составили 15,2 % и 9,6 %, соответственно. Высокая интенсивность пиков глинистых

минералов и потери масс позволяет предположить более высокое содержание глинистых минералов в глине 1 в сравнении с глиной 2.

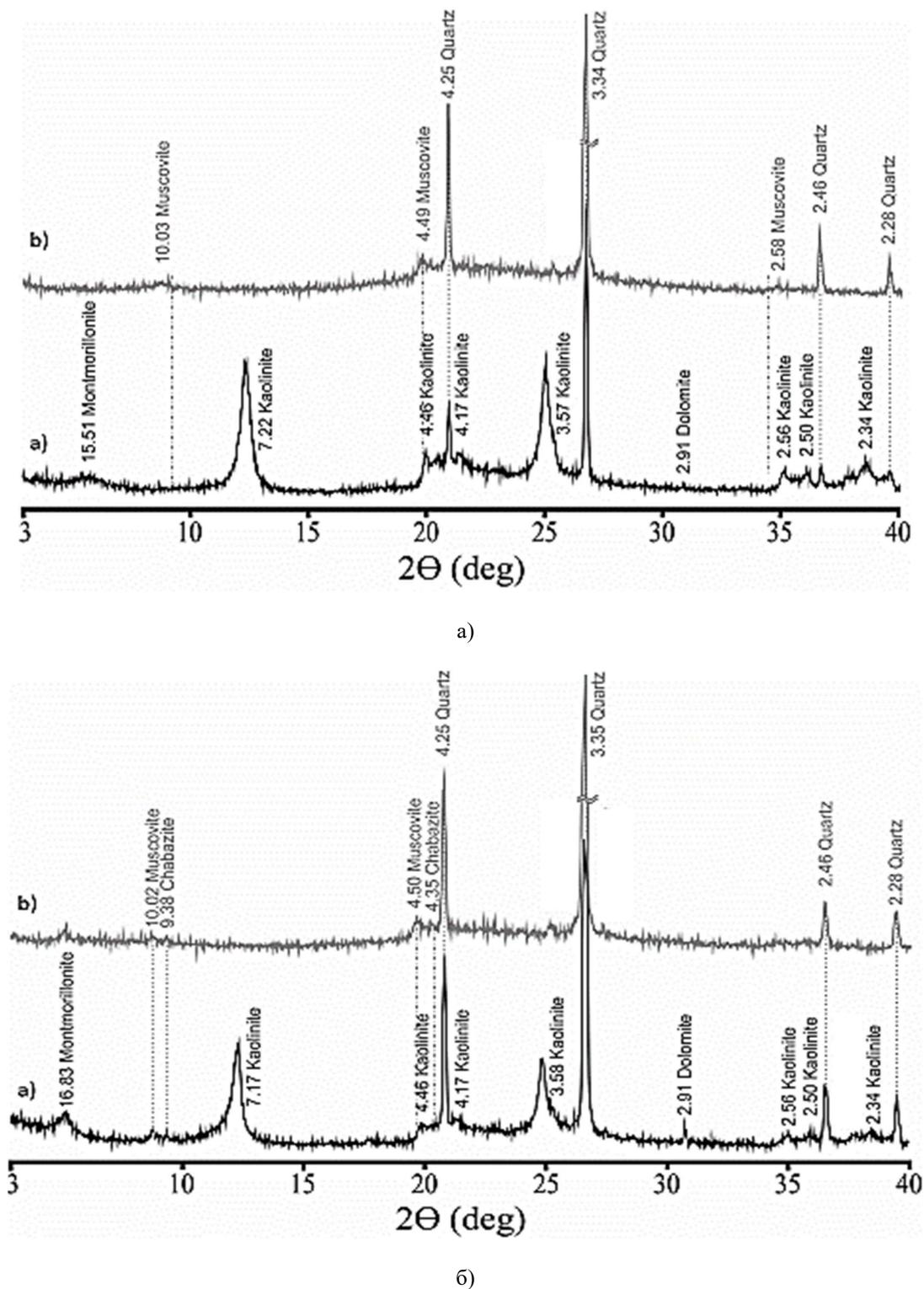
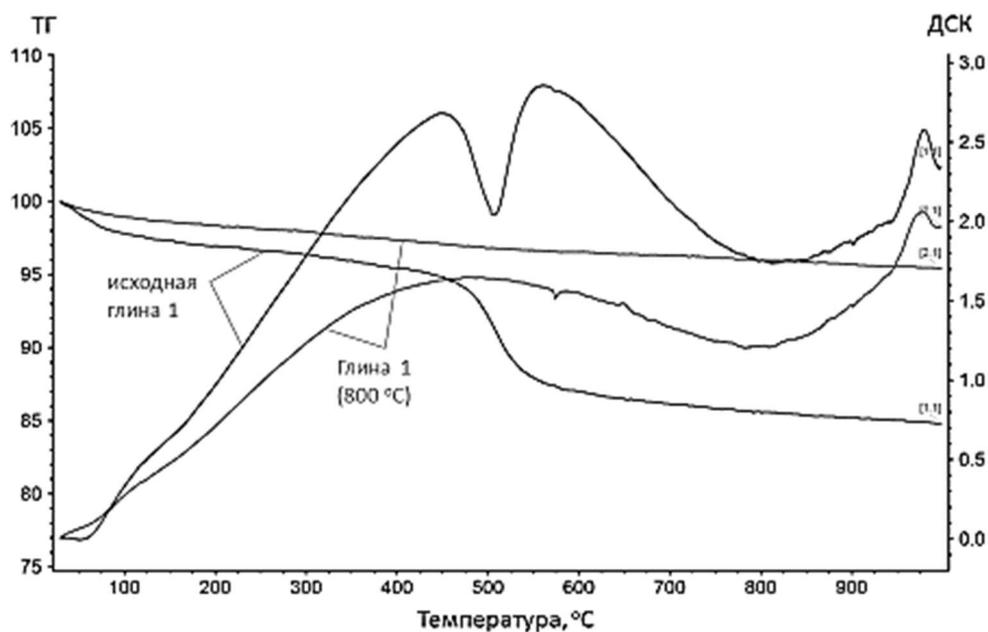
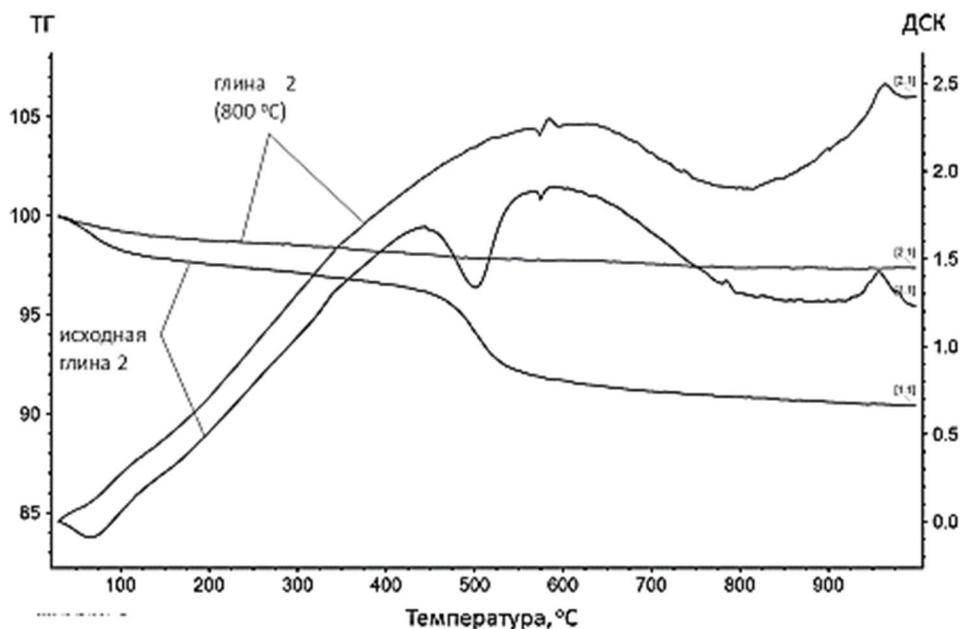


Рис. 1. Дифрактограммы глины в исходном 1 (а) и термоактивированном состоянии 2 (б) (иллюстрация авторов)

Результаты определения содержания аморфной фазы глин и ее состава приведены в табл. 2. Глина 1 содержит почти вдвое больше аморфной фазы, чем глина 2, что позволяет предполагать ее большую реакционную способность в составе АЩЦ.



а)



б)

Рис. 2. Результаты термического анализа глины 1 (а) и глины 2 (б) (иллюстрация авторов)

Таблица 2

**Содержание реакционноспособной фазы
и соотношение реакционноспособных оксидов $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в термоактивированных глинах**

Глина	Содержание реакционноспособной фазы (%)	Соотношение реакционноспособных $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
Глина 1	60	1,54
Глина 2	33	1,72

Глины обжигались при температуре 800°C в течение 1 ч. Исходные материалы измельчались в планетарной мельнице МПЛ-1, их удельная поверхность определялась на приборе ПСХ-9. Прочность при сжатии образцов определялась испытанием образцов

камня размером 2×2×2 см в возрасте 2 и 28 суток после твердения в нормально-влажностных условиях. Состав продуктов твердения образцов определялся в возрасте 28 суток методами рентгенофазового анализа (РФА) с использованием DIFFRAC plus Evaluation Package – EVA Search/Match, термогравиметрическим (ТГ-ДТГ) с использованием STA 443 F3 Jupiter simultaneous thermal analysis apparatus.

3. Результаты

На рис. 3 приведены результаты исследования влияния содержания и вида глины на прочность при сжатии в возрасте 2 и 28 суток композиционных шлакощелочных вяжущих (КШЩВ). Из приведенных данных следует, что с увеличением содержания термоактивированных глин прочность при сжатии КШЩВ в возрасте 2 суток снижается. При этом более существенное снижение прочности отмечено для составов с добавкой из термоактивированной глины 2. Прочность КШЩВ в возрасте 28 суток остается практически неизменной при введении термоактивированной глины 1 до 30 % и снижается до 9,3 % при введении термоактивированной глины 2 при том же количественном содержании. Более высокая совместимость шлака с термоактивированной глиной 1 объясняется более высоким содержанием аморфной фазы по сравнению с глиной 2 и, как следствие, реакционной способностью последней.

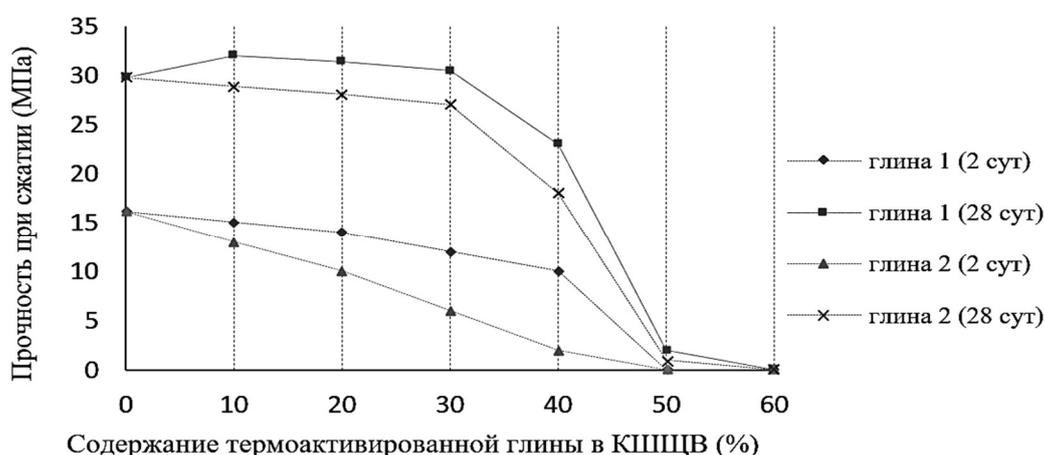


Рис. 3. Влияние содержания добавок термоактивированной глины на прочность КШЩВ (иллюстрация авторов)

Для определения причин резкого снижения прочности образцов в возрасте 28 суток при увеличении содержания добавок термоактивированных глин в составе КШЩВ более 30 % исследован состав продуктов твердения контрольного состава шлакощелочного вяжущего (ШЩВ) и КШЩВ с добавками термоактивированных глин в количестве 30 и 40 %. Дифрактограммы образцов ШЩВ и КШЩВ представлены на рис. 4.

В образце контрольного состава ШЩВ обнаружены рентгеноаморфный гель С-(А)-S-H, о чем свидетельствует широкий пик в диапазоне 28-31° 2θ, а также кристаллические гидроталькит $Mg_{0.667}Al_{0.333}(OH)_2(CO_3)_{0.167}(H_2O)_{0.5}$ и кальцит $CaCO_3$. Введение термоактивированных глин приводит к изменению состава геля и к образованию новых продуктов твердения. Анализ ранее выполненных исследований по влиянию термоактивированных глин с различным содержанием реакционноспособной фазы на состав продуктов реакции КШЩВ [16, 21, 22] позволяет предполагать образование геля смешанного состава С-N-(А)-S-H, что подтверждается образованием цеолитов в композиционных вяжущих системах [23, 24]. Широкий пик, относящийся к гелю С-N-(А)-S-H, сужается и становится менее выраженным при замене шлака 30 % термоактивированных глин, что свидетельствует об уменьшении объема его образования. Почти полное исчезновение пика в диапазоне 28-31° 2θ, в КШЩВ с добавками 40 % термоактивированных глин свидетельствует о резком снижении объема образования геля С-N-(А)-S-H, это связано с уменьшением содержания реакционноспособной фазы в исходных материалах при неизменном и низком содержании щелочного компонента и

объясняет значительное ухудшение механических свойств КШЩВ. Кроме того, увеличение содержания добавок термоактивированных глин более 30 % приводит к образованию цеолитов – фожазита- $\text{NaNa}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, фожазита-К, анальцима $\text{Na}_{10}\text{Mg}_3\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96} \cdot 25\text{H}_2\text{O}$, и снижению содержания Са-содержащих новообразований – кальцита и гидроталькита.

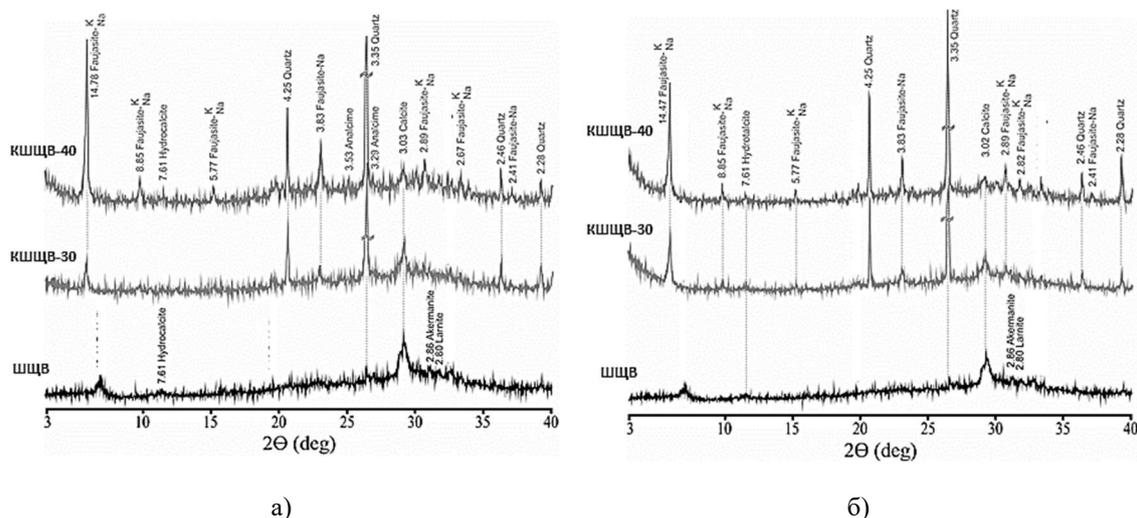


Рис. 4. Дифрактограммы образцов ШЩВ и КШЩВ с добавкой 30 % (КШЩВ-30) и 40 % (КШЩВ-40) термоактивированных глин 1 (а) и 2 (б) (иллюстрация авторов)

Снижение содержания алюмосиликатного геля в КШЩВ с добавками термоактивированных глин более 30 % подтверждено также термическим анализом. Потери масс в диапазоне 50–200°C, свидетельствующие о дегидратации алюмосиликатного геля и гидроталькита [25], в контрольном составе составили – 9,5 %, КШЩВ с 30 % термоактивированной глины 1 – 5,6 %, с 40 % – 5,2 %.

4. Обсуждение

Анализ полученных результатов позволил выявить особенности процессов свойства- и структурообразования КШЩВ с добавками термоактивированных глин. Более высокая реакционная способность глины с содержанием аморфной фазы 60 %, по сравнению с глиной с содержанием аморфной фазы 33 %, обеспечивает более высокую совместимость со шлаком при низком содержании щелочного компонента и позволяет производить замену шлака в количестве до 30 % без снижения прочности при сжатии КШЩВ в возрасте 28 суток. Влияние термоактивированных глин на механические свойства связано с содержанием и составом аморфной фазы в них на состав и объём продуктов твердения КШЩВ. Общее уменьшение содержания аморфной фазы и изменение ее состава в направлении снижения реакционноспособного Са с одновременным увеличением Si и Al в смеси шлака и термоактивированных глин при возрастающем соотношении «шлак/термоактивированная глина» приводит к снижению объема образования кальциево-натриевого алюмосиликатного гидрогеля, определяющего механические свойства камня на основе КШЩВ. В результате этих изменений замена шлака термоактивированной глины приводит к снижению объема образования алюмосиликатного гидрогеля как носителя прочности искусственного каменного материала на основе КШЩВ и изменения его состава, сопровождающегося формированием новообразований цеолитов. Ухудшение механических свойств образцов на основе КШЩВ также связано с формированием пористых и малопрочных цеолитовых новообразований. Термоактивированная глина с содержанием аморфной фазы 33 % не обладает достаточной реакционной способностью для использования в качестве полноценной замены шлака в составе КШЩВ при низком содержании щелочного активатора.

5. Заключение

1. Возможность использования термоактивированных глин в качестве дополнительного алюмосиликатного компонента и их влияние на механические свойства и состав продуктов твердения КШЩВ в значительной степени определяется содержанием реакционноспособной фазы в глинах.

2. Установлена пригодность термоактивированной глины с содержанием аморфной фазы 60 % для замены шлака до 30 % без снижения прочности и получения КШЩВ, активированного щелочным компонентом низкой концентрации, с прочностью при сжатии 30 МПа в возрасте 28 суток.

3. Термоактивированная глина с содержанием аморфной фазы 33 % не обладает достаточной реакционной способностью и непригодна для получения КШЩВ при низком содержании щелочного компонента.

4. Полученные результаты расширяют представления о сырьевом потенциале термоактивированных глин для получения бесклинкерных низкообжиговых КШЩВ.

Список библиографических ссылок

1. Khalifa A. Z., Cizer Ö., Pontikes Y., Heath A., Patureau P., Bernal S. A., Marsh A. T. M. Advances in alkali-activation of clay minerals // *Cement and Concrete Research*. 2020. № 132. P. 106050. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106050.
2. Rakhimova N. R., Rakhimov R. Z. Advances in development of calcined clays as supplementary cementitious materials // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. № 890. P. 012085. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012085.
3. Халиуллин М. И., Файзрахманов И. И. Влияние пластифицирующей добавки на состав композиционного гипсового вяжущего с применением термоактивированной глины // *Известия КГАСУ*. 2019. № 3 (49). С. 190–196.
4. Рахимов Р. З., Рахимова Н. Р., Гайфуллин А. Р., Бикмухаметов А. Р., Морозов В. П. Влияние состава и температуры прокаливания добавок каолиновой и полиминеральной глины в портландцемент на свойства цементного камня // *Известия КГАСУ*. 2019. № 3 (49). С. 172–180.
5. Provis J. L., van Deventer J. S. J. Alkali activated materials: State-of-the-Art Report. RILEM. TC 224-AAM. : Springer, 2014.
6. Pacheco-Torgal F., Labrincha J., Leonelli C., Palomo A., Chindaprasit P. Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes : Elsevier, 2014.
7. Bature A. S., Khorami M., Ganjian E., Tyrer M. Influence of alkali activator type and proportion on strength performance of calcined clay geopolymer mortar // *Construction and Building Materials*. 2021. № 267. P. 120446. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120446.
8. Rakhimova N. R. Recent advances in blended alkali-activated cements: a review // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2020. DOI: 10.1080/19648189.2020.1858170.
9. Рахимова Н. Р. Получение цеолитсодержащих материалов на основе термоактивированных глин // *Техника и технология силикатов*. 2020. № 3. С. 85–90.
10. Xue L., Zhang Z., Wang H. Hydration mechanisms and durability of hybrid alkaline cements (HACs): A review // *Construction and Building Materials*. 2021. № 266. P. 121039. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121039.
11. Garcia-Lodeiro I., Boudissa N., Fernandez-Jimenez A., Palomo A. Use of clays in alkaline hybrid cement preparation. The role of bentonites // *Materials Letters*. 2018. № 233. P. 134–137. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.08.098.
12. Yip C. K., Lukey G. C., van Deventer J. S. J. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate of alkaline activation // *Cement and Concrete Research*. 2005. № 35 (9). P. 1688–1697. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.10.042.
13. Puertas F., Fernandez-Jimenez A. Mineralogical and microstructural characterization of alkali-activated fly ash/slag pastes // *Cement and Concrete Composites*. 2003. № 25 (3). P. 287–292. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00059-8.

14. Buchwald A., Tatarin R., Stephan D. Reaction progress of alkaline-activated metakaolin-ground granulated blast furnace slag blends // *Journal of Materials Science*. 2009. № 44 (20). P. 5609–5617. DOI: 10.1007/s10853-009-3790-3.
15. Paradal X., Brunet F., Charpentier T., Pochard I., Nonat A. ^{27}Al and ^{29}Si solid-state NMR characterization of calcium-aluminosilicate-hydrate // *Inorganic Chemistry*. 2012. № 5. P. 1827–1836. DOI: 10.1021/ic202124x.
16. Bernal S. A., de Gutierrez R. M., Provis J. L., Rose V. Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags // *Cement and Concrete Research*. 2010. № 40 (6). P. 898–907. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.003.
17. Borges P. H. R., Banthia N., Alcamand H. A., Vasconcelos W. L., Nunes E. H. M. Performance of blended metakaolin/blast furnace slag alkali-activated mortars // *Cement and Concrete Composites*. 2016. № 71. P. 42–52. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.04.
18. Dietel J., Warr L. N., Bertmer M., Steudel A., Grathoff G. H., Emmerich K. The importance of specific surface area in the geopolymerization of heated illitic clay // *Applied Clay Science*. 2017. № 139. P. 99–107. DOI: 10.1016/j.clay.2017.01.001.
19. D’Elia A., Pinto D., Eramo G., Giannossa L. C., Ventruti G., Laviano R. Effects of processing on the mineralogy and solubility of carbonate-rich clays for alkaline activation purpose: Mechanical, thermal activation in red/ox atmosphere and their combination // *Applied Clay Science*. 2018. № 152. P. 9–21. DOI: 10.1016/j.clay.2017.11.036.
20. Rieger D., Kovářík T., Říha J., Medlín R., Novotný P., Bělský P., Holba P. Effect of thermal treatment on reactivity and mechanical properties of alkali activated shale-slag binder // *Construction and Building Materials*. 2015. № 83. P. 26–33. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.024.
21. Burciaga-Díaz O., Escalante-García J. I. Comparative performance of alkali activated slag/metakaolin cement pastes exposed to high temperatures // *Cement and Concrete Composites*. 2017. № 84. P. 157–166. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.09.007.
22. Rashad A. M., Essa G. M. F. Effect of ceramic waste powder on alkali-activated slag pastes cured in hot weather after exposure to elevated temperature // *Cement and Concrete Composites*. 2020. P. 103617. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103617.
23. Puertas F., Palacios M., Manzano H., Dolado J. S., Rico A., Rodríguez J. A model for C-A-S-H gel formed in alkali activated slag cements // *Journal of European Ceramic Society*. 2011. № 31 (12). P. 2043–2056. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036.
24. Provis J. L., van Deventer J. S. J. *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, Woodhead Publishing Ltd. Sawston Cambridge (UK). 2009. 454 p.
25. Ben Haha M., Le Saout G., Winnefeld F., Lothenbach B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags // *Cement and Concrete Research*. 2011. № 41. P. 301–310. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.11.016.

Rakhimova Nailia Ravilevna

doctor of technical sciences, professor

Email: rahimova.07@list.ru

Rakhimova Ravil Zufarovich

doctor of technical sciences, professor

Email: rahimov5@bk.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Influence of calcined clays additions on the composition
of reaction products and properties of compositional alkali-activated slag cements
with low content of alkali reactant**

Abstract

Problem statement. The purpose of the study is to investigate the features of the property- and structure-formation processes of binary ground granulated blast furnace slag – calcined

clays cements activated by 4M NaOH concerning percentage, amount and chemistry of reactive phase of calcined clays.

Results. The main reaction products of compositional alkali-activated slag cement were C-N-(A)-S-H gel, calcite, zeolites, faujazite, analcime. Compositional alkali-activated slag cement incorporated with 28 days compressive strength up to 30 MPa is proposed as a result of performed studies.

Conclusions. It is stated that thermally treated clay with a 60 % of reactive phase was found to be suitable as a supplementary precursor to granulated blast furnace slag. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that the presented results contribute to the development of theoretical basis, raw materials base and range of non-clinker low-temperature mineral binders.

Keywords: slag, clay, alkali, binder, calcination, strength.

For citation: Rakhimova N. R., Rakhimov R. Z. Influence of calcined clays additions on the composition of reaction products and properties of compositional alkali-activated slag cements with low content of alkali reactant // *Izvestija KGASU*. 2021. № 2 (56). P. 50–59. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_50.

References

1. Khalifa A. Z., Cizer Ö., Pontikes Y., Heath A., Patureau P., Bernal S. A., Marsh A. T. M. Advances in alkali-activation of clay minerals // *Cement and Concrete Research*. 2020. № 132. P. 106050. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106050.
2. Rakhimova N. R., Rakhimov R. Z. Advances in development of calcined clays as supplementary cementitious materials // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. № 890. P. 012085. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012085.
3. Haliullin M. I., Fajzrahmanov I. I. Vliyanie plastificiruyushchej dobavki na sostav kompozicionnogo gipsovogo vyazhushchego s primeneniem termoaktivirovannoj gliny // *Izvestiya KGASU*. 2019. № 3 (49). P. 190–196.
4. Rahimov R. Z., Rahimova N. R., Gajfullin A. R., Bikmuhametov A. R., Morozov V. P. Vliyanie sostava i temperatury prokalivaniya dobavok kaolinovoj i polimineral'noj gliny v portlandcement na svojstva cementnogo kamnya // *Izvestiya KGASU*. 2019. № 3 (49). P. 172–180.
5. Provis J. L., van Deventer J. S. J. Alkali activated materials: State-of-the-Art Report. RILEM. TC 224-AAM.: Springer, 2014.
6. Pacheco-Torgal F., Labrincha J., Leonelli C., Palomo A., Chindaprasit P. Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes : Elsevier, 2014.
7. Bature A. S., Khorami M., Ganjian E., Tyrer M. Influence of alkali activator type and proportion on strength performance of calcined clay geopolymer mortar // *Construction and Building Materials*. 2021. № 267. P. 120446. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120446
8. Rakhimova N. R. Recent advances in blended alkali-activated cements: a review // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2020. DOI: 10.1080/19648189.2020.1858170.
9. Rahimova N. R. Poluchenie ceolitsoderzhashchih materialov na osnove termoaktivirovannyh glin // *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2020. № 3. С. 85–90.
10. Xue L., Zhang Z., Wang H. Hydration mechanisms and durability of hybrid alkaline cements (HACs): A review // *Construction and Building Materials*. 2021. № 266. P. 121039. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121039.
11. Garcia-Lodeiro I., Boudissa N., Fernandez-Jimenez A., Palomo A. Use of clays in alkaline hybrid cement preparation. The role of bentonites // *Materials Letters*. 2018. № 233. P. 134–137. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.08.098.
12. Yip C. K., Lukey G. C., van Deventer J. S. J. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate of alkaline activation // *Cement and Concrete Research*. 2005. № 35 (9). P. 1688–1697. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.10.042.

13. Puertas F., Fernandez-Jimenez A. Mineralogical and microstructural characterization of alkali-activated fly ash/slag pastes // *Cement and Concrete Composites*. 2003. № 25 (3). P. 287–292. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00059-8.
14. Buchwald A., Tatarin R., Stephan D. Reaction progress of alkaline-activated metakaolin-ground granulated blast furnace slag blends // *Journal of Materials Science*. 2009. № 44 (20). P. 5609–5617. DOI: 10.1007/s10853-009-3790-3.
15. Paradal X., Brunet F., Charpentier T., Pochard I., Nonat A. ^{27}Al and ^{29}Si solid-state NMR characterization of calcium-aluminosilicate-hydrate // *Inorganic Chemistry*. 2012. № 5. P. 1827–1836. DOI: 10.1021/ic202124x.
16. Bernal S. A., de Gutierrez R. M., Provis J. L., Rose V. Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags // *Cement and Concrete Research*. 2010. № 40 (6). P. 898–907. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.003.
17. Borges P. H. R., Banthia N., Alcamand H. A., Vasconcelos W. L., Nunes E. H. M. Performance of blended metakaolin/blast furnace slag alkali-activated mortars // *Cement and Concrete Composites*. 2016. № 71. P. 42–52. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.04.
18. Dietel J., Warr L.N., Bertmer M., Steudel A., Grathoff G. H., Emmerich K. The importance of specific surface area in the geopolymerization of heated illitic clay // *Applied Clay Science*. 2017. № 139. P. 99–107. DOI: 10.1016/j.clay.2017.01.001.
19. D'Elia A., Pinto D., Eramo G., Giannossa L. C., Ventruti G., Laviano R. Effects of processing on the mineralogy and solubility of carbonate-rich clays for alkaline activation purpose: Mechanical, thermal activation in red/ox atmosphere and their combination // *Applied Clay Science*. 2018. № 152. P. 9–21. DOI: 10.1016/j.clay.2017.11.036.
20. Rieger D., Kovářik T., Říha J., Medlín R., Novotný P., Bělský P., Holba P. Effect of thermal treatment on reactivity and mechanical properties of alkali activated shale-slag binder // *Construction and Building Materials*. 2015. № 83. P. 26–33. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.024
21. Burciaga-Díaz O., Escalante-García J. I. Comparative performance of alkali activated slag/metakaolin cement pastes exposed to high temperatures // *Cement and Concrete Composites*. 2017. № 84. P. 157–166. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.09.007.
22. Rashad A. M., Essa G. M. F. Effect of ceramic waste powder on alkali-activated slag pastes cured in hot weather after exposure to elevated temperature // *Cement and Concrete Composites*. 2020. P. 103617. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103617.
23. Puertas F., Palacios M., Manzano H., Dolado J. S., Rico A., Rodríguez J. A model for C-A-S-H gel formed in alkali activated slag cements // *Journal of European Ceramic Society*. 2011. № 31 (12). P. 2043–2056. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036.
24. Provis J. L., van Deventer J. S. J. *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, Woodhead Publishing Ltd. Sawston Cambridge (UK). 2009. 454 p.
25. Ben Haha M., Le Saout G., Winnefeld F., Lothenbach B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags // *Cement and Concrete Research*. 2011. № 41. P. 301–310. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.11.016.