

УДК 691.3

## ИЗУЧЕНИЕ ФЕНОМЕНА ВЫСОЛООБРАЗОВАНИЯ В ШЛАКОЩЕЛОЧНЫХ ВЯЖУЩИХ СИСТЕМАХ

Глазков Р.А., аспирант, гр. АСА-225, II курс

Чалов Д.С., магистрант, гр. МНС-232, I курс

Научный руководитель: Кожухова Н.И., к.т.н., доцент

Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова, г. Белгород

**Аннотация:** Данная статья рассматривает проблемы высолов в шлакощелочных системах, содержащих в своем составе гипсосодержащий отход, их влияние на технические и эстетические характеристики, а также их методы контроля. В статье проанализированы физико-химические свойства шлакощелочных материалов, демонстрирующих образование высолов во время процесса твердения. С помощью энерго-дисперсионного анализа, а также растровой электронной микроскопии изучен механизм их образования, а также выдвинуты предположения о технологических аспектах, инициирующих этот процессы высолообразования, с целью оптимизации синтеза шлакощелочных материалов и обеспечения высокого качества строительных композиций на их основе.

В современном мире шлакощелочные вяжущие системы играют важную роль благодаря своим высоким техническим и экономическим показателям. Однако, важной проблемой, с которой сталкиваются научные исследователи, является присутствие высолов [1, 2].

Высолы – это растворенные соли, которые образуются на поверхности бетонных, в том числе, и шлакощелочных изделий в процессе их производства и эксплуатации. Они представляют собой химические соединения, которые могут вымываться из материала под воздействием воды или влаги, оставляя на поверхности конструкций или сооружения белые разводы, которые негативно отражаются на их эстетической составляющей.

Изучение высолов в строительной индустрии имеет важное значение, поскольку позволяет оптимизировать процессы производства и применения шлакощелочных вяжущих материалов, обеспечивая повышение качества и долговечности строительных конструкций, а также их эстетического вида. Это также способствует уменьшению возможных негативных эффектов (низкая прочности, коррозия армирующих элементов, ухудшение эстетического вида, ускоренный процесс изнашивания) на окончательный вид и характеристики сооружений из этих материалов.

Основные компоненты высолов в шлакощелочных вяжущих обычно включают в себя соли кальция ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ), калия ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KCl}$ ), натрия

( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ) и другие минеральные соединения, образующиеся в процессе химических реакций между основными составляющими вяжущих и добавками, а также в результате взаимодействия непрореагировавшей щелочи с диоксидом углерода воздуха [3, 4].

Для высолов в шлакощелочных вяжущих характерны следующие физико-химические свойства:

1. Растворимость в воде: высолы обычно легко растворяются в воде, что может привести к их вымыванию из материала при воздействии влаги.

2. Температурная зависимость: некоторые высолы могут изменять свою растворимость и химическую активность в зависимости от температуры окружающей среды.

3. Влияние на pH: высолы могут изменять кислотно-щелочной баланс в строительных конструкциях при их взаимодействии с окружающей средой.

4. Кристаллическая структура: высолы способны образовывать кристаллические структуры, что влияет на их физические свойства и поведение их в материале и на характеристики материала, в целом.

5. Внешний вид: высолы могут проявляться на поверхности строительных конструкций в виде белых пятен или разводов при высыхании материала [5–7].

Механизмы образования высолов в шлакощелочных вяжущих, связаны с химическими реакциями между основными компонентами материала (например, известью, гипсом) и добавками (например, содой, солями). Эти реакции приводят к образованию растворенных солей, которые могут вымываться из материала при воздействии влаги, образуя высолы на его поверхности [8, 9].

Образование высолов в шлакощелочных вяжущих материалах обусловлено несколькими факторами. Во-первых, высокая влажность окружающей среды способствует растворению солей, присутствующих в материале, что ускоряет процесс их вымывания. Во-вторых, наличие растворенных солей в самом материале, например, в результате не полной гидратации или реакций разложения вяжущих компонентов, также может способствовать образованию высолов [10]. Кроме того, высокие температуры могут ускорять химические реакции в материале, в результате чего происходит более интенсивное вымывание солей и образование высолов на поверхности. Эти факторы, в совокупности, определяют условия, при которых происходит образование высолов в шлакощелочных вяжущих.

Технологические аспекты играют ключевую роль в высолообразовании шлакощелочных вяжущих материалах. Например, состав и пропорции добавляемых компонентов, условия смешивания и температурные режимы в процессе производства могут существенно влиять на химические реакции, приводящие к образованию высолов. Также важным фактором является метод отверждения и хранения готового продукта, так как неправильно подобранные условия могут способствовать выделению и миграции высолов на поверхность материала. Кроме того, применение различных технологических

добавок и модификаторов может изменять характеристики реакции высолообразования, влияя на его интенсивность и распределение по объему материала. Учет и оптимизация этих технологических аспектов играют важную роль в контроле высолообразования и обеспечении качества шлакощелочных вяжущих материалов [11, 12].

Образование высолов на поверхности материалов из шлакощелочных вяжущих также способно оказывать существенное влияние на их прочностные характеристики. Прежде всего, наличие высолов может приводить к уменьшению механической прочности конструкций из-за изменения структуры и свойств материала в процессе его эксплуатации. Это происходит за счет внутренних напряжений и деформаций, вызванных присутствием высолов, что, в конечном итоге, может привести к повреждениям и разрушению эксплуатируемого сооружения или конструкции [13]. Важным аспектом является также, присутствие продуктов высолообразования в материале способствует ухудшению адгезии между вяжущим и заполнителями или армирующими элементами, что снижает сцепление и увеличивает вероятность отслоения или разрушения конечного композита. Из-за этих факторов контроль содержания высолов в материале становится важным аспектом производства для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик сооружений и конструкций.

Кроме того, высолы в шлакощелочных вяжущих системах могут существенно снижать долговечность и устойчивость к агрессивным воздействиям изделий на их основе. Даже небольшие процентные содержания высолов (например, менее 1%) могут вызывать коррозию армирующих элементов в бетоне, что приводит к потере прочности и стабильности конструкции. При увеличении доли высолов, например, до 3–5%, риск разрушения и деформаций в материале значительно возрастает из-за усиления интенсивности химического взаимодействия окружающей средой и внутренними напряжениями, возникающими в структуре материала [14, 15].

В рамках этого исследования были изучены прочностные и микроструктурные особенности шлакощелочных вяжущих систем с разными щелочными активаторами и с добавлением цитрогипса – гипсосодержащего отхода производства лимонной кислоты, как модифицирующей добавки для ускорения сроков схватывания, а также элементный состав образующихся высолов.

Для проведения эксперимента были заформованы составы шлакощелочных вяжущих, активированных  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и  $\text{NaOH}$ . Более детальный компонентный состав и показатели прочности на сжатие для экспериментальных вяжущих представлены в таблице.

Результаты, приведенные в таблице, показали, что при активации вяжущей системы «шлак – цитрогипс – соль  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ », образцы после 7 суток твердения демонстрируют почти нулевую прочность по сравнению с  $\text{NaOH}$ -активированными образцами.

Таблица

**Компонентный состав и свойства шлакощелочных вяжущих**

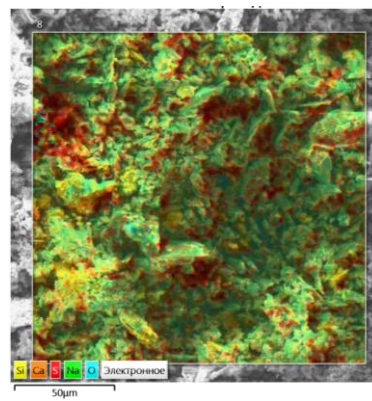
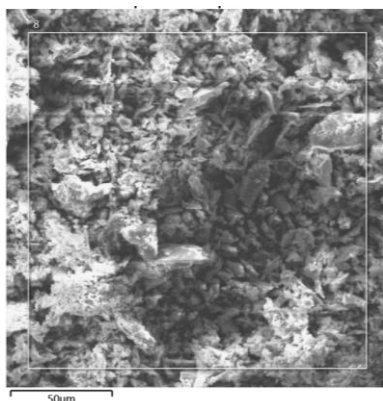
Состав	Компоненты, %				Предел прочно- сти при сжатии, МПа
	Шлак	Цитрогипс	Щелочной активатор		
			Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaOH	
1	73.9	3.9	5.3	—	0.1
2	74.5	3.9	—	4	37

Кроме того, на поверхности образцов из Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-активированных шлакощелочных вяжущих наблюдается значительное количество рыхлого белого слоя, который, вероятно, является продуктом высолообразования в процессе твердения вяжущей системы.

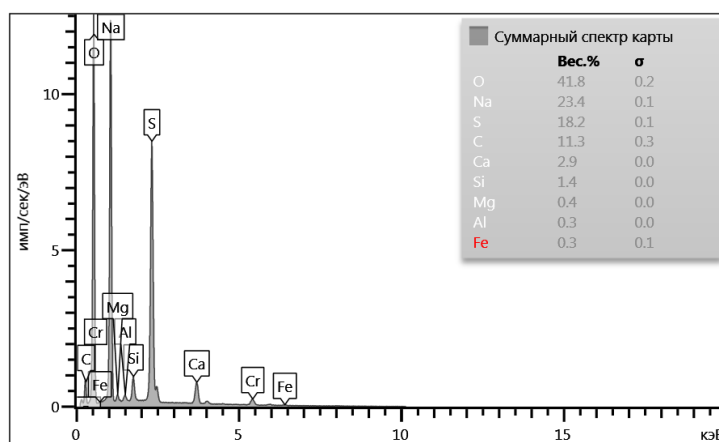
Для идентификации природы образовавшегося слоя, с поверхности экспериментальных образцов была взята проба и проанализирована с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энерго-дисперсионного (ЭДС) анализа (рисунок).

Представленные на рисунке РЭМ-снимки (изображения а, в) демонстрируют рыхлую субстанцию абсолютно несвязанных между собой частиц от 2 до 50 микрон анизометричной формы.

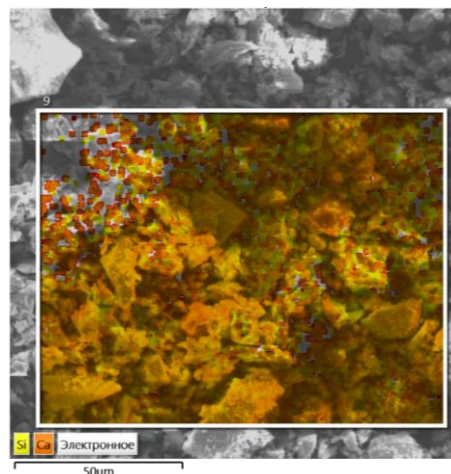
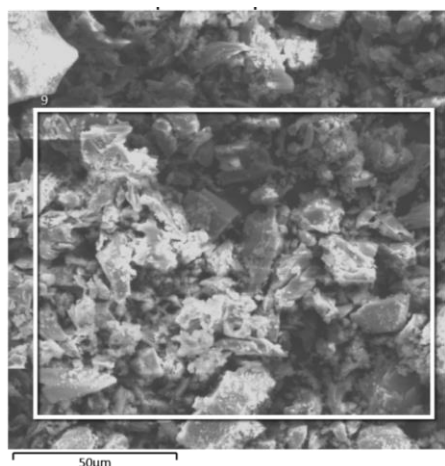
а



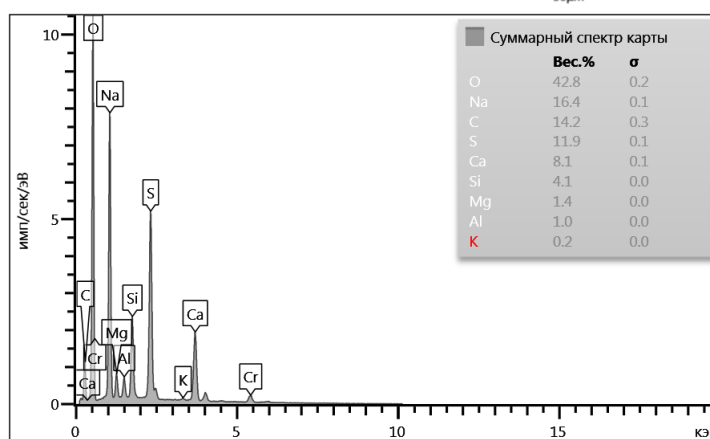
б



В



Г



**Рисунок** – РЭМ-анализ (а, в) и ЭДС-анализ (б, г) высолов, образующихся на поверхности образцов шлакощелочных вяжущих

ЭДС-анализ исследуемых высолов (изображения б, г) показал, что в их составе преимущественно содержатся следующие элементы: Si, Ca, S and Na. Наличие представленного перечня элементов позволяет предположить, что в составе высолов присутствуют непрореагировавшая со шлаком соль  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (элемент Na, изображение а), а также цитрогипс в своём исходном состоянии (элементы Ca, S, изображения а, в). Наличие Si-элемента, относящегося к шлаковому компоненту, может указывать на слабый щелочешлаковый каркас, что подтверждается нулевыми показателями прочности  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -активированных образцов.

Таким образом, результаты исследований показали, что при добавлении добавки цитрогипса в состав шлакощелочных вяжущих систем, активированных  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , имеет место процесс высолообразования. С большой долей вероятности можно предположить, что продукты высолообразования на поверхности образцов затвердевших шлакощелочных вяжущих, являются результатом неполного химического связывания всех сырьевых компонентов в шлакощелочной вяжущей системе.

*Исследования выполнены в рамках реализации программы «Приоритет 2030», с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

### Список литературы

1. Saludung A., Azeyanagi T., Ogawa Y., Kawai K. Effect of silica fume on efflorescence formation and alkali leaching of alkali-activated slag // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 315. 128210. 10.1016/j.jclepro.2021.128210.
2. Сыса О. К., Морева И. Ю., Трепалина Ю. Н., Чепурных А.А., Локтионов В.А., Локтионова Е.В. Глинистое сырье для производства светлоокрашенного керамического кирпича в аспекте высолообразования солей ванадия // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 12. С. 130-139. DOI 10.34031/2071-7318-2019-4-12-130-139.
3. Srinivasamurthy L., Chevali V., Zhang Z., Longhi M., Loh T., Wang H. Mechanical property and microstructure development in alkali activated fly ash slag blends due to efflorescence // *Construction and Building Materials*. 2022. 332. 127273. 10.1016/j.conbuildmat.2022.127273.
4. Tang D., Yang C., Li X., Zhu X., Yang K., Yu L. Mitigation of efflorescence of alkali-activated slag mortars by incorporating calcium hydroxide // *Construction and Building Materials*. 2021.298. 123873. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123873
5. Najafi Kani E., Allahverdi A., Provis J. L. Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Cement and Concrete Composites*. 2012. 34(1). P. 25–33. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.07
6. Yao X., Yang T., Zhang Z. Compressive strength development and shrinkage of alkali-activated fly ash–slag blends associated with efflorescence // *Materials and Structures*. 2015. 49(7). P. 2907–2918. doi:10.1617/s11527-015-0694-3
7. Zhang Z., Provis J. L., Reid A., Wang H. Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence // *Cement and Concrete Research*. 2014. 64. P. 30–41. doi:10.1016/j.cemconres.2014.06.0
8. Zhang Z., Provis J. L., Ma X., Reid A., Wang H. Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers // *Cement and Concrete Composites*. 2018. 92. P. 165–177. doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.06.010
9. Kozhukhova N. I., Shurakov I. M., Alfimova N. I., Zhernovskaya I.V., Kozhukhova M.I. Using of Citrogypsum in Alkali Activated Systems // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Vol. 307. P. 17–22. DOI 10.1007/978-3-031-20459-3\_3.
10. Scherer G. W. Stress from crystallization of salt. *Cement and Concrete Research*. 2004. 34(9). P. 1613–1624. doi:10.1016/j.cemconres.2003.12.034
11. Kang S.-P., Kwon S.-J. Effects of red mud and Alkali-Activated Slag Cement on efflorescence in cement mortar // *Construction and Building Materials*. 2017. 133. 459–467. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.123
12. Dow C., Glasser F. Calcium carbonate efflorescence on Portland cement and building materials // *Cement and Concrete Research*. 2003. 33(1). P. 147–154. doi:10.1016/s0008-8846(02)00937-7
13. Wang J., Zhou T., Xu D., Zhou Z., Du P., Xie N., Liu Y. Effect of nano-silica on the efflorescence of waste based alkali-activated inorganic binder // *Construc-*

- tion and Building Materials. 2018. 167. P. 381–390. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.006
14. Eloukabi H., Sghaier N., Ben Nasrallah S., Prat M. Experimental study of the effect of sodium chloride on drying of porous media: The crusty–patchy efflorescence transition // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. 56(1–2). P. 80–93. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.09.045
15. Sun K., Peng X., Wang S., Zeng L., Ran P., Ji G. Effect of nano-SiO<sub>2</sub> on the efflorescence of an alkali-activated metakaolin mortar // Construction and Building Materials. 2020. 253. 118952. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118952