

Свойства бетона на геополимерном вяжущем из золы-уноса

Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, А.В. Харнаев, С.М. Саденко

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

Аннотация: Исследовано влияние соотношения золы-уноса и доменного шлака в геополимерном вяжущем на свойства бетона, твердеющего при тепловлажностной обработке. Получены данные о влиянии состава вяжущего на удобоукладываемость бетонной смеси, прочность и усадку бетона. Установлены зависимости влияния температуры твердения и доли шлака в вяжущем на прочность геополимерного бетона. Полученные результаты позволили рекомендовать исследованное вяжущее и бетон на его основе для опытного промышленного производства сборных железобетонных конструкций.

Ключевые слова: геополимерное вяжущее, зола-унос, шлак доменный, бетон, прочность, удобоукладываемость, водопоглощение, усадка.

Одними из наиболее перспективных направлений развития современного строительного материаловедения являются разработка и совершенствование технологий материалов, удовлетворяющих принципам устойчивого развития [1]. К числу таких технологий относится малоэнергоемкое производство геополимерных общестроительных вяжущих на основе промышленных отходов алюмосиликатного состава [2]. Преимуществами таких вяжущих считается низкий углеродный след их производства в сравнении с производством портландцемента [3], которое в настоящее время дает 5-7 % промышленных выбросов углекислого газа в атмосферу [1].

Геополимерные вяжущие получают путем щелочной активации алюмосиликатного сырья природного происхождения и побочных отходов промышленности – каолина, шлаков, зол и др. [4, 5]. Большой потенциал в технологии геополимеров имеет применение крупнотоннажных отходов – зол-уноса, полученных при сжигании угля на тепловых электростанциях [1, 4]. Зола-унос находится в дисперсном состоянии и не требует значительных затрат энергии на измельчение до более высокой поверхности.

В некоторых работах [2, 6] отмечается, что для геополимерных бетонов характерны высокие значения усадочных деформаций, которые могут привести к трещинообразованию и снижению их долговечности. Считается, что применение добавки шлака в бетоне на геополимерном вяжущем из золы-уноса позволяет обеспечить повышение его трещиностойкости [7, 8].

Для предотвращения деструктивных процессов при твердении геополимерного бетона на основе золы-уноса очень важно подобрать оптимальный режим его твердения. Ранее было установлено, что снижение прочностных характеристик геополимерного вяжущего происходит вследствие кратковременной предварительной выдержки и интенсивной скорости подъема температуры тепловой обработки [9].

Установлено [8, 10], что оптимальное содержание шлака в составах геополимерного вяжущего на основе золы может составлять от 20 до 30 %.

Целью настоящей работы было проведение исследований по установлению влияния расхода модифицирующей добавки шлака, а также температуры тепловой обработки на свойства тяжелого бетона, изготовленного на основе геополимерного вяжущего из золы-уноса.

В качестве основного компонента геополимерного вяжущего использовалась кислая зола Томь-Усинской ГРЭС, содержащая СаО менее 5 %, что является одним из условий применения в качестве активатора жидкого стекла [11].

Компоненты вяжущего отдельно измельчались в лабораторной шаровой мельнице. Зола-унос измельчалась до удельной поверхности 600 м²/кг, а доменный гранулированный шлак Новолипецкого металлургического комбината - до удельной поверхности 380 м²/кг.

Для активации процесса твердения геополимерного бетона применялся комплексный активатор на основе натриевого жидкого стекла с силикатным модулем 2,6 и гидроксида натрия. В качестве крупного заполнителя бетона

использовался гранитный щебень фр. 5...10 мм, а в качестве мелкого – кварцевый песок с $M_k=1,52$. Расход щебня во всех составах составлял 1030, песка – 610 кг/м^3 . Содержание шлака в вяжущем варьировалось в интервале от 8 до 32 %.

Таблица №1

Составы бетона для исследования

Наименование компонента	Расход компонента, кг/м^3			
	1	2	3	4
Шлак доменный	38,4	76,7	115,0	153,4
Зола-унос	372,6	340,2	307,8	275,4
Жидкое стекло	120	120	120	120
NaOH	11,5	11,5	11,5	11,5
Вода	126	126	126	126

Приготовление бетонной смеси производилось по следующей процедуре: готовилось вяжущее тесто из смеси золы и шлака, которое перемешивалось с водой затворения, в которую предварительно вводился раствор щелочного активатора, полученное геополимерное тесто перемешивалось с заполнителем.

Оценка удобоукладываемости бетонной смеси осуществлялась по осадке нормального стандартного конуса (ГОСТ 10181).

Для определения прочности при сжатии геополимерного бетона и его водопоглощения из бетонной смеси были изготовлены образцы-кубы с размером ребра 70 мм, а для оценки усадочных деформаций бетона – образцы-призмы размером $40 \times 40 \times 160$ мм. Все образцы подвергались тепловой обработке (ТВО), которая проводилась по режиму: предварительная выдержка в лаборатории в течение 20 часов, подъем температуры до 60 или 80 °С за 3 часа, изотермическая выдержка – 10 часов и остывание в пропарочной камере за 12-14 часов. ТВО осуществлялась в

лабораторной пропарочной камере КУП-1. Для определения водопоглощения и усадки использовались образцы после ТВО при температуре 60 °С.

Для оценки водопоглощения затвердевшие образцы высушивались до постоянной массы при температуре (103±2) °С, а затем после остывания помещались в емкость с водой до полного насыщения в течение нескольких суток.

Усадка определялась по изменению расстояния между установленными при формировании реперами с помощью индикатора часового типа. Продолжительность определения усадочных деформаций при выдержке образцов в условиях лаборатории – 4 месяца.

Анализ графика (рис. 1), построенного по результатам определения осадки конуса, показывает, что увеличение в составе доли шлака от 8 до 24 % повышает удобоукладываемость геополимерной бетонной смеси; увеличение дозировки шлака до 32 % уже не влияет на подвижность смеси.

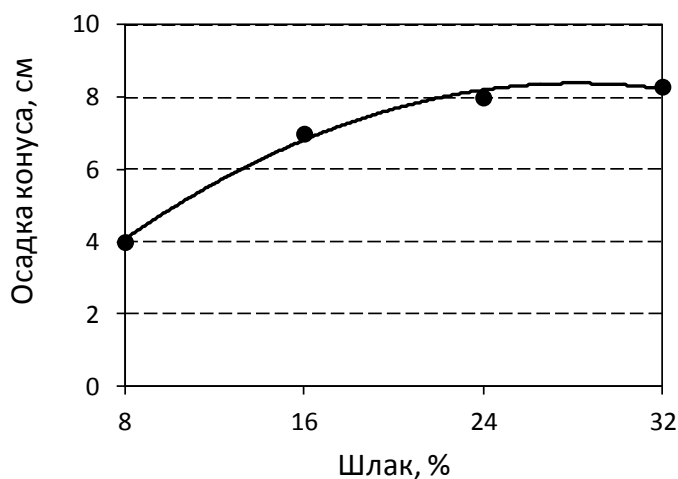


Рис. 1. – Влияние доли шлака в геополимерном вяжущем на осадку конуса бетонной смеси

Прочность исследованных геополимерных бетонов также повышается при увеличении доли шлака в вяжущем до 24 %, а затем практически не меняется (рис. 2).

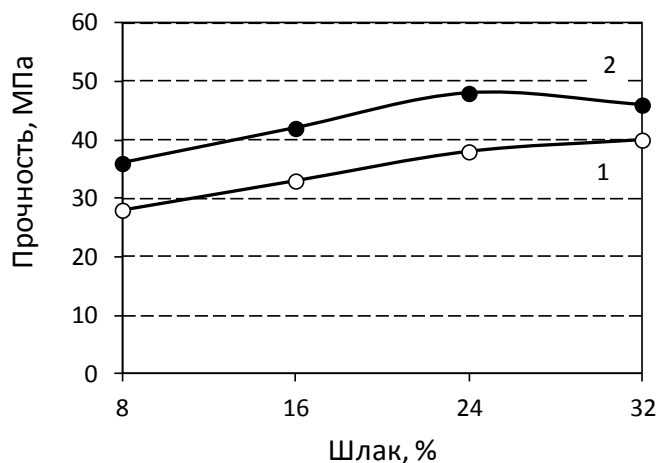


Рис. 2. – Влияние доли шлака на прочность геополимерного бетона:

1 – после ТВО при 60 °С; 2 – после ТВО при 80 °С

Повышение температуры ТВО с 60 до 80 °С обеспечивает незначительный рост прочности – на 6-10 МПа (см. рис. 2). Анализ графиков, показывает, что увеличение температуры до 80 °С позволяет сократить расход шлака с 32 до 16 % без снижения прочности бетона – приблизительно 40 МПа. Установленные зависимости могут быть использованы для оптимизации технологических режимов производства геополимерных бетонов.

Установлено, что увеличение от 8 до 24 % доли шлака в вяжущем приводит к повышению водопоглощения геополимерного бетона приблизительно в 1,5 раза (рис. 3). Однако численные значения этой характеристики бетона невелики – менее 4,5 %, что намного ниже требований стандартов к водопоглощению бетона тротуарных плит и бортовых камней, для которых этот показатель качества является одним из условий обеспечения долговечности.

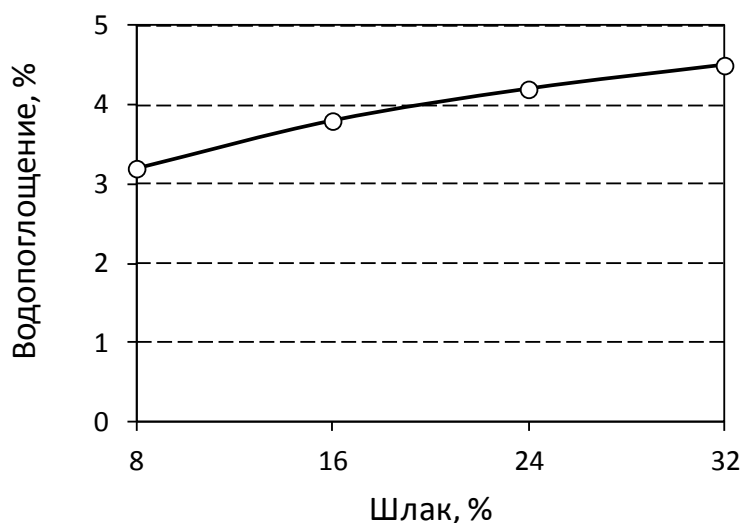


Рис. 3. – Влияние дозировки шлака на водопоглощение геопалимерного бетона

Увеличение дозировки шлака приводит к снижению усадки исследованного геопалимерного бетона с 0,65 до 0,45 мм/м (рис. 4.). Полученные значения усадки сопоставимы с усадкой портландцементных бетонов и намного ниже значений усадки геопалимерного бетона, изготовленного с применением измельченных отходов дробления магматических горных пород [5].

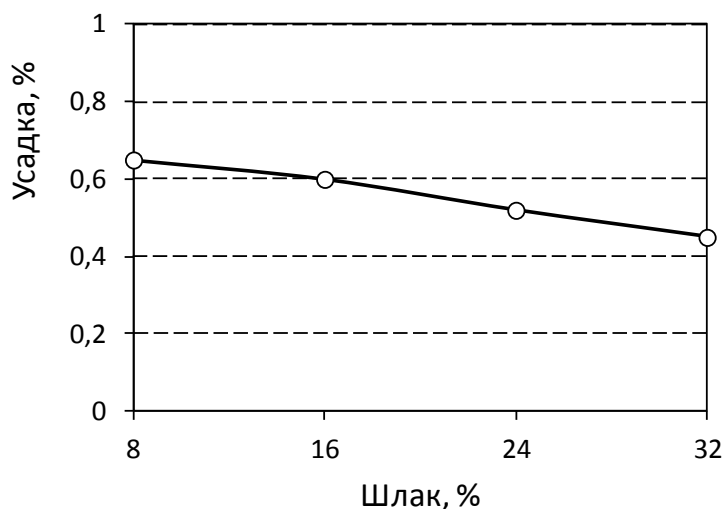


Рис. 4. Усадка геопалимерного бетона

Результаты исследований бетона, изготовленного с применением геополимерного вяжущего на основе золы-уноса с добавкой доменного шлака, показывают, что такие бетоны могут иметь прочность в интервале от 30 до 50 МПа, что соответствует требованиям к бетонам общестроительного назначения. Увеличение доли шлака в вяжущем повышает удобоукладываемость бетонной смеси, положительно влияет на прочность и усадку бетона, но при этом повышает водопоглощение бетона. Увеличение дозировки шлака позволяет снизить температуру тепловой обработки бетона. Исследованные бетоны могут использоваться для опытного промышленного производства и эксплуатации сборных железобетонных конструкций.

Литература

1. Shobeiri V., Bennet B., Xie T., Visintin P. A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymer concrete // J. Clean. Prod. 2021; 297: 126669. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126669.
2. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. 4th edition. Saint-Quentin, France, 2015. 644 p.
3. Корнеев В.И., Брыков А.С. Перспективы развития общестроительных вяжущих веществ. Геополимеры и их отличительные особенности // Цемент и его применение. – 2010. – № 2. – С. 51-55.
4. Philip S., Nidhi M. A review on the material performance of geopolymer concrete as green building materials // Materials Today: Proceedings. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.110.
5. Руднов В.С., Герасимова Е.С. Способы регулирования свойств геополимербетонов // Инженерный вестник Дона. 2020, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2020/6545.

6. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О. Усадка геополимерного вяжущего на различных этапах его структурообразования // Инженерный вестник Дона. 2016. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3620.

7. Deb P.S., Nath P., Sarker P.K. Drying Shrinkage of Slag Blended Fly Ash Geopolymer Concrete Cured at Room Temperature // Procedia Engineering. 2015. Vol. 125. pp. 594-600. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.066.

8. Srinivasamurthy L., Chevali V. S., Zhang Z., Wang H. Effect of fly ash to slag ratio and Na₂O content on leaching behaviour of fly Ash/Slag based alkali activated materials // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 383. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131234.

9. Eroshkina N., Korovkin M. The Effect of the Mixture Composition and Curing Conditions on the Properties of the Geopolymer Binder Based on Dust Crushing of the Granite // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.137.

10. Ukritnukun S., Koshy P., Feng C. et al. Development of Low-Alkali, Fly Ash/Slag Geopolymers: Predictive Strength Modelling and Analyses of Impact of Curing Temperatures // Minerals. 2021. 11(1), 60. DOI: 10.3390/min11010060.

11. Hardjito D., Rangan B. V. Development and Properties of Low-Calcium, Fly Ash-based Geopolymer Concrete. Research Report GC1. – Perth: Curtin University of Technology, 2005. 103 p.

References

1. Shobeiri V., Bennet B., Xie T., Visintin P.J. Clean. Prod. 2021;297:126669. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126669.

2. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. 4th edition. Saint-Quentin, France, 2015. 644 p.

3. Korneev V.I., Brykov A.S. Tsement i ego primeneniye. – 2010. – № 2. – pp. 51-55.



4. Philip S., Nidhi M. *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.110.
5. Rudnov V.S., Gerasimova E.S. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2020, №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2020/6545.
6. Eroshkina N.A., Korovkin M.O. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2016, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3620.
7. Deb P.S., Nath P., Sarker P. K. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 125. pp. 594-600. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.066.
8. Srinivasamurthy L., Chevali V.S., Zhang Z., Wang H. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 383. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131234.
9. Eroshkina N., Korovkin M. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.137.
10. Ukritnukun S., Koshy P., Feng C. et al. *Minerals*. 2021. 11(1), 60. DOI: 10.3390/min11010060.
11. Hardjito D., Rangan B.V. *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete*. Research Report GC1. Perth: Curtin University of Technology, 2005. 103 p.