



## Получение бетонов на бесцементной основе с золой-унос и ломом бетона

*И. И. Романенко, И.Н. Петровнина, М.И. Шереметьева, Д.М. Лобашина*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза*

**Аннотация.** Целью исследования было определить влияние количества щелочного активатора твердения на геополимерное вяжущее состоящее из молотого доменного шлака и золы-унос. Молотый доменный шлак с золой-унос активировали силикатом натрия (СН) при различном содержании раствора щелочи (Щ). Результаты показали, что увеличение содержания щелочного активатора (СН: Щ= 5%: 3% → 15%:4%) способствует росту прочности бетона на всем временном интервале наблюдения за контролем набора прочности. Добавление золы-уноса повлияло на увеличение прочности образцов бетона при сжатии от 16 до 18% относительно составов без золы-унос. Микро трещинообразование проявляется в составах геополимерных бетонов без золы-унос, активированных раствором силиката натрия при более высоком силикатном модуле. Снижение силикатного модуля СН привело к меньшему образованию микротрещин и более однородной структуре, а введение в бетонную смесь золы - унос способствует устранению внутренних напряжений и образованию микротрещин на поверхности образцов бетона.

**Ключевые слова:** побочные продукты, доменные шлаки, щелочные активаторы твердения, наполнители, эксплуатационные свойства, драйвер развития.

В связи с ростом в последнее время объемов и темпов строительства существенно увеличивается спрос на использование экологически чистых и безопасных продуктов в производстве строительных материалов и изделий на основе вторичных продуктов металлургической и химической промышленности это, во-первых. А во-вторых существенное падение природных запасов кварцевого песка, прочных и высокопрочных горных пород, пригодных для использования в строительстве, приводит к удорожанию себестоимости материалов не только из-за монополизации сырьевого рынка, но и увеличения логистических цепочек между горно-обогатительными предприятиями, поставщиками и заводами по переработке исходного природного сырья [1-3].

Из-за нехватки природных ресурсов ученые стали разрабатывать технологии по широкому спектру повторного применения отходов, в том числе строительного мусора и лома бетон в производстве строительных

---

материалов, обладающих новыми эксплуатационными свойствами. Доменные граншлаки являются одним из не многочисленных отходов который можно использовать в производстве, щебня, песка, кирпича, легких газобетонов, тяжелых бетонов, но и в качестве гидравлического вяжущего [4-6].

Для получения, вяжущего требуется тонкое измельчение гранулированного доменного шлака до удельной поверхности портландцемента и щелочной его активации. Как ответственные, так и зарубежные ученые с середины 50-х годов 20 столетия использовали в качестве алюмосиликатного компонента вяжущего, отходы химической промышленности, доменные шлаки черной и цветной металлургии, золунос ГРЭС, метаксаолин, горелые земли [7-9].

На данный момент стоимость молотого доменного шлака приближается к стоимости портландцемента (9 000- 12 000 руб/т). Поэтому драйвером применения без клинкерных вяжущих является его стоимость, которая складывается из стоимости щелочного компонента и молотого шлака [10, 11]. Исходя из анализа литературных источников нами исследовались составы бетонов с минимальным расходом щелочного активатора твердения и возможностью получения бетонов прочностью класса В20 - В30, которые находят широкое применения в строительной индустрии России.

Благодаря разработанной технологии нами решается «Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» за счет: производства комплексных модифицированных вяжущих с минимальным содержанием портландцементного клинкера (20-40 %) и минеральных добавок (60-80 %); получение бес клинкерной технологии гидравлических вяжущих на основе щелочных активаторов твердения при широком применении зол ТЭЦ, доменных шлаков, обожжённых глин [12-14].

---

## Материалы и методики исследований

В качестве исходных материалов использовали доменные граншлаки ПАО «Северсталь» фракции 5-10 мм, золу-унос Рефтинской ГРЭС ( $S_{уд}=3200$  см<sup>2</sup>/г), водный раствор силиката натрия плотностью 1,49 г/см<sup>3</sup>, водный раствор щелочи NaOH, лом бетона марки М300 фракции 5-10 мм, песок речной с модулем крупности  $M_{кр}=1,5-1,7$ , питьевую воду в качестве воды затворения. Химический состав мелкодисперсных компонентов вяжущего представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав золы-унос и молотого доменного граншлака

Наименование	оксиды								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO
Зола-унос (Рефтинская ГРЭС)	69,12	21,16	3,91	2,1	1,03	0,63	0,58	0,5	0,48
Молотый граншлак (ПАО «Северсталь»)	37,28	10,29	0,13	37,41	0,21	0,53	0,672	0,02	12,3

Граншлак предварительно сушили в сушильном шкафу, а затем измельчали в лабораторной двух камерной шаровой мельнице до удельной поверхности  $S_{уд} = 2870$  см<sup>2</sup>/г. Дозировка щелочного компонента вяжущего составляет 5-15 % от массы сухого вяжущего. Растворо шлаковое отношение (Р/Ш) составляет во всех составах 0,39. Бетонную смесь приготавливали в лабораторном смесителе принудительного действия. Образцы формовались в металлических формах тройчатках размером 100 × 100 × 100 мм. Уплотнение производили на лабораторной виброплощадке 20 сек. Отформованные образцы помещались в пластиковые контейнера и твердели в них при температуре воздуха  $22 \pm 2$  °С и влажности  $90 \pm 5$  % 7, 14 и 28 суток.

Испытания на сжатие проводили на гидравлическом прессе. Водопоглощение образцов оценивали в возрасте 28 суток.

### Результаты и обсуждение.

Составы бетонной смеси и результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2

#### Физико-механические свойства бетонов на бесклинкерном вяжущем

Ингредиент/свойства	состав					
	1	2	3	4	5	6
Молотый граншлак, кг/м <sup>3</sup>	420	275	420	275	420	275
Зола-унос, кг/м <sup>3</sup>	–	145	–	145	–	145
Речной песок, кг/м <sup>3</sup>	680	680	680	680	680	680
Крупный заполнитель, г/м <sup>3</sup>	1170	1170	1170	1170	1170	1170
Силикат натрия, %	5	5	10	10	15	15
NaOH, %	3	3	2	2	4	4
Воды до, л	164	164	164	164	164	164
Р/Ш	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Прочность на сжатие, МПа в возрасте:						
7 суток	14,1	17,6	19,9	22,5	25,2	29,7
14 суток	19,6	23,2	22,6	24,1	28,7	33,3
28 суток	24,8	26,1	27,3	29,8	36,6	42,1
Водопоглощение, %	4,2	3,9	3,9	3,4	3,4	2,8

При затворении молотого доменного граншлака как с золой - унос, так и без нее жидким стеклом и щелочью значительное влияние оказывают на набор прочности следующие процессы: щелочная активация минералов доменного шлака и золы уноса и антагонизм этому процессу – образование кремнегеля. Чем выше значение  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  жидкого стекла ( $>1,1$ ), тем ниже содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  и тем меньше влияние на прочностные показатели щелочной активации. В тоже время при этом идет процесс образования большего количества кремнегеля. Таким образом, NaOH в активации шлака выступает в роли катализатора процесса гидратации вяжущего на основе

доменного шлака и при недостаточном его содержании происходит замедление как темпов набора прочности бетонов, так и величины самой прочности.

В тоже время крупный заполнитель на основе лома бетонов не является антагонистом в шлакощелочном бетоне. В заполнителе на основе лома бетона присутствует не прореагировавший клинкерный фонд, активированная поверхность щебня за счет дробления лома бетона в щековой дробилке, что позволяет увеличить прочность композиционного материала за счет повышения адгезии вяжущего к заполнителю и неровности излома на крупном заполнителе.

Присутствие в вяжущем мелкодисперсной части золы-унос способствует увеличению плотности цементного камня и снижению пористости, что видно по результатам водопоглощения (см. табл. 2).

### **Выводы**

1. Полученные значения прочности на уровне 20,0-40,0 МПа демонстрируют перспективность использования щелочной активации доменных шлаков для получения высокопрочных строительных материалов. В качестве активатора предпочтительнее использовать высокощелочное жидкое стекло совместно с NaOH.
  2. В качестве крупного заполнителя целесообразно применять щебень из бетонного лома.
  3. Производство геополимерных бетонов основывается на оборудовании, которое применяется для производства бетонов на основе портландцемента.
  4. Комплексное применение отходов производств способствует решению как экологических, так и экономических вопросов для развития экономики регионов.
-

## Литература

1. Кривенко П.В. Синтез вяжущих с заданными свойствами в системе  $\text{Me}_2\text{O}-\text{MeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. 05.17.11. Киев, 1986. С. 40.
2. Rakhimova N., Rakhimov R. Properties and structure formation of a stone of compositional slag alkaline bindings with siliceous mineral additives // XIII International Congress on the Chemistry of Cement. Madrid, 2011. 200 p.
3. Schepper M. De, Vernimmen L., Belie N. De. The Assessment of Clinker and Cement Regenerated from Completely Recyclable Concrete // XIII International Congress on the Chemistry of Cement. Madrid, 2011. 67 p.
4. Bilek V. Slag alkaline concrete with mineral admixtures // XIII International Congress on the Chemistry of Cement. Madrid, 2011. 90 p.
5. Клименко Н.Н., Колокольчиков И.Ю., Михайленко Н.Ю., Орлова Л.А., Сигаев В.Н. Новые строительные материалы с повышенной прочностью на основе отходов металлургии // Стекло и керамика, 2018. №5. С. 44-48.
6. Романенко И.И., Петровнина И.Н. Кинетика набора прочности бетонов на композиционном вяжущем, наполненном молотым доменным граншлаком // Инженерный вестник Дона, 2023. №11. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8828](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8828).
7. Ашрабова М.А. Шлакощелочные бетоны высокой прочности для водохозяйственного строительства // Техника. Технологии. Инженерия, 2018. №3(9). С. 23-25.
8. Романенко И.И., Романенко М.И., Петровнина И.Н., Фадин А.И., Горохова А.А. Пробуждение гидравлической активности граншлаков химическими веществами // Инженерный вестник Дона, 2020. №11. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7988](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7988).

9. Deb P.S., Nath P., Sarker P.K. Drying shrinkage of slag and fly ash based geopolymer concrete cured at room temperature // Procedia Engineering, 2015. pp. 594–600.

10. Humad A.M., Provis J.L., Zwierzen A. Alkali activation of high-strength magnesium oxide concrete-properties of fresh and hardened concrete // Magazine of Concrete Research, 2018. №70. pp. 1–24.

11. Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н., Романенко М.И. Влияние модификаторов структуры шлакощелочного вяжущего на трещинообразование // Инженерный вестник Дона, 2021. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7076.

12. Chan J., Li N., Li H. Properties of fresh and hardened alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers // Construction and Building Materials, 2014. №50, pp. 169-176.

13. Shi K., Roy D., Krivenko P. Alkali-activated cements and concretes. NY: CRC Press, Taylor & Francis, 2006. 392 p.

14. Li N., Jiang J., Li H. Early-age shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag binder and mortar // Cement and Concrete Composites, 2014. №53, pp. 239-248.

### References

1. Krivenko P.V. Sintez vyazhushchikh s zadannymi svoystvami v sisteme  $Me_2O-MeO-Me_2O_3-SiO_2-N_2O$  [Synthesis of binders with specified properties in the system  $Me_2O-MeO-Me_2O_3-SiO_2-H_2O$ ]: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. 05.17.11. Kiyev, 1986. 40 p.

2. Rakhimova N., Rakhimov R. XIII International Congress on the Chemistry of Sement. Madrid, 2011. 200 p.

3. Schepper M. De, Vernimmen L., Belie N. De. XIII International Congress on the Chemistry of Cement. Madrid, 2011. 67 p.



4. Bilek V. XIII International Congress on the Chemistry of Cement. Madrid, 2011. 90 p.
5. Klimenko N.N., Kolokol'chikov I.YU., Mikhaylenko N.YU., Orlova L.A., Sigayev V.N. Steklo i keramika, 2018. №5. pp. 44-48.
6. Romanenko I.I., Petrovnina I.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. №11. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8828](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8828).
7. Ashrabova M.A. Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya, 2018. №3 (9). pp. 23-25.
8. Romanenko I.I., Romanenko M.I., Petrovnina I.N., Fadin A.I., Gorokhova A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020. №11. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7988](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7988).
9. Deb P.S., Nath P., Sarker P.K. Procedia Engineering, 2015. pp. 594–600.
10. Humad A.M., Provis J.L., Zwierzen A. Magazine of Concrete Research, 2018. №70. pp. 1–24.
11. Romanenko I.I., Fadin A.I., Petrovnina I.N., Romanenko M.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021. № 7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7076](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7076).
12. Chan J., Li N., Li H. Construction and Building Materials, 2014. №50, pp. 169-176.
13. Shi K., Roy D., Krivenko P. Alkali-activated cements and concretes. NY: CRC Press, Taylor & Francis, 2006. 392 p.
14. Li N., Jiang J., Li H. Cement and Concrete Composites, 2014. №53, pp. 239-248.

**Дата поступления: 26.12.2025**

**Дата публикации: 1.02.2025**