

Факторы повышения ранней прочности шлаковых бетонов с добавками

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0020>

Номер статьи: C0020

Сметанин Алексей Алексеевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
аспирант

Санкт-Петербург, Россия

citysell1@gmail.com

Нуриев Али Гасаналиевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
магистрант

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 3617-9118

informatiks20@gmail.ru

Гиндуллин Тимур Русланович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
студент

Санкт-Петербург, Россия

mr.timurik2007@yandex.ru

Статья получена: 02.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликовано онлайн: 25.12.2025. © РИОР

Аннотация. Введение гранулированного доменного шлака в цементные составы является одним из ключевых резервов для повышения как экономической эффективности цементных составов с точки зрения стоимости и расхода цемента, так и для улучшения технических свойств. В работе представлены результаты исследования кинетики набора ранней прочности на сжатие бетона на основе молотого гранулированного доменного шлака (граншлака) в зависимости от количества граншлака и добавки в составах портландцемент-граншлак. Наиболее эффективной добавкой для повышения прочности бетона на основе цемента с 70% содержанием граншлака в возрасте 12 и 24 часов при нормальных условиях твердения является двухкомпонентная добавка, содержащая суперпластификатор на основе сульфонафталинформальдегида в количестве 50% и Na_2SO_4 в количестве 50%. При тепловлажностной обработке при 60°C как двухкомпонентная добавка, так и суперпластификатор на основе поликарбоксилата обеспечивают увеличение ранней прочности до 80%.

Ключевые слова: устойчивое развитие, экологичное строительство, поликарбоксилатный суперпластификатор, сульфат натрия, ранняя прочность

Factors for increasing the early strength of slag concretes with additives

Smetanin Alexey Alekseevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
postgraduate student

St. Petersburg, Russia

citysell1@gmail.com

Nuriev Ali Gasanalievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
master's student
St. Petersburg, Russia
informatiks20@gmail.ru

Gindullin Timur Ruslanovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
student
St. Petersburg, Russia
mr.timurik2007@yandex.ru

Abstract. The introduction of granular blast furnace slag into cement compositions is one of the key reserves for increasing both the economic efficiency of cement compositions in terms of cost and consumption of cement, and for improving technical properties. The paper presents the results of a study of the kinetics of the early compressive strength of concrete based on ground granular blast furnace slag (granslak), depending on the amount of granslak and additives in the compositions of Portland cement granslak. The most effective additive for increasing the strength of cement-based concrete with 70% granulated slag content at the age of 12 and 24 hours under normal hardening conditions is a two-component additive containing a superplasticizer based on sulfonaphthalene formaldehyde in an amount of 50% and Na_2SO_4 in an amount of 50%. During heat and moisture treatment at 60 °C, both a two-component additive and a polycarboxylate-based superplasticizer provide an increase in early strength of up to 80%.

Keywords: sustainable development, eco-friendly construction, polycarboxylate superplasticizer, sodium sulfate, early strength

Введение

Мировая цементная промышленность наращивает производство цемента, содержащего тонкодисперсные компоненты различных шлаков. Это позволяет экономить ресурсы природного сырья за счет использования промышленных побочных продуктов, а также снижать выбросы CO_2 и улучшать технологические характеристики бетонной смеси, такие как удобоукладываемость, и технические характеристики затвердевшего бетона [1]. Цемент на основе гранулированного доменного шлака (портландцемент/шлак), производимый путем совместного помола клинкера, шлака и гипса, имеет более продолжительное время схватывания по сравнению с портландцементом с тем же составом клинкера. Начало схватывания наступает через 4-6 часов, конец — через 10-12 часов [2]. Для ускорения твердения бетона на основе молотого гранулированного доменного шлака можно использовать: тепловлажностную обработку, водоредуцирующую добавку, ускоритель твердения, уменьшение размера частиц шлака путем помола [3].

Тепловлажностная обработка с температурой более 80°C используется для производства бетона на основе гранулированного доменного шлака. Однако, это приводит к снижению морозостойкости бетона. Ухудшение физико-механических свойств и долговечности бетона, подвергнутого тепловлажностной обработке при температуре 80°C и выше, можно объяснить образованием вторичного эттрингита ($[\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12}](\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), что указывает на необходимость снижения температуры пропаривания и использования других методов повышения ранней прочности или комбинации нескольких методов [1-3].

С развитием технологии помола стало возможным получение тонких минеральных наполнителей из гранулированного доменного шлака с удельной поверхностью, превышающей удельную поверхность портландцемента, с последующим смешиванием портландцемента и тонкомолотого шлака. Среди факторов положительного влияния тонкомолотого шлака на структуру цементной матрицы можно выделить следующие: увеличение ранней прочности бетона с тонкодисперсными минеральными добавками из

шлака, что позволяет снизить температуру при тепловлажностной обработке; усиление пластифицирующего эффекта суперпластификатора в некоторых составах портландцемент-шлак, что позволяет уменьшить количество воды [4]. Снижение количества воды за счет использования водоредуцирующей добавки уменьшает капиллярную пористость бетона, тем самым повышая его плотность и морозостойкость [27-30].

Введение щелочного активатора решает проблему композитных цементов — низкой ранней прочности и увеличения времени схватывания. Доказано [5], что добавление NaOH в цемент ПЦ/шлак приводило к сокращению времени схватывания с увеличением дозировки NaOH. В работе [6] показано, что значительное увеличение прочности цемента ПЦ/шлак может быть достигнуто путем добавления 4% Na_2SO_4 . Добавление силиката натрия очень значительно увеличивало раннюю прочность растворов ПЦ/шлак. Композитные цементы сочетают положительные характеристики традиционных материалов на основе портландцемента с характеристиками щелочно-активированных материалов, создавая материалы с повышенной долговечностью и механическими свойствами.

Для повышения ранней прочности бетона на основе цемента ПЦ/шлак необходимо изучить влияние комбинации добавки суперпластификатора и ускорителя твердения Na_2SO_4 , а также сравнить ее с поликарбоксилатным суперпластификатором. Для повышения морозостойкости бетона необходимо снизить температуру тепловлажностной обработки без увеличения продолжительности обработки и при обеспечении требуемой ранней прочности.

Методы и материалы

При исследовании использованы методы количественного и гравиметрического анализа, а также методы определения свойств и микроскопии.

Использовались обычный портландцемент (ЦЕМ 42,5) и тонкомолотый граншлак с распределением частиц по размерам, полученным с помощью анализатора «Analysette 22». Распределение частиц по размерам показано в Таблице 1. Химический состав граншлака представлен в Таблице 2. В качестве добавки была выбрана водоредуцирующая добавка на основе поликарбоксилатов (РСЕ), которая благодаря определенной структуре молекулы подходит для производства сборного железобетона. Другая добавка содержала два компонента: суперпластификатор на основе сульфонафталинформальдегида в количестве 50% и Na_2SO_4 в количестве 50%.

Таблица 1

Распределение частиц по размерам

Количество частиц размером менее, %			
1 мкм	5 мкм	10 мкм	50 мкм
6.2	31.8	48.1	93.9

Таблица 2

Химический состав граншлака, %

CaO	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	MgO	SO_3
42.8	35.9	11.4	0.27	0.33	6.44	2.4

Экспериментальные результаты и дискуссия

Молотый шлак содержит 48,1% частиц размером менее 10 мкм. Водопотребность цементного теста без граншлака составляет 27,5%. Однако при замене части портландцемента на граншлак в количестве 70% водоцементное отношение становится 30,9%. Увеличение водопотребности цементного теста приводит к увеличению водопотребности бетонных смесей, что снижает прочность и морозостойкость

затвердевшего бетона. Соответственно, целесообразно использовать водоредуцирующие добавки при применении тонкомолотых наполнителей из граншлака в бетонной смеси.

Влияние количества тонкомолотого граншлака на прочность бетона исследовали после тепловлажностной обработки при разных температурах и в возрасте 28 дней, как показано в Таблице 3. Соотношение вяжущего к песку было равно 1:3.

Было установлено, что прочность образцов после тепловлажностной обработки при температуре 60°C и продолжительности 12 часов, в которых часть портландцемента была заменена тонкомолотым граншлаком в количестве 70%, соответствовала прочности образцов без шлака после тепловлажностной обработки при температуре 80°C. Снижение прочности образцов, подвергнутых тепловлажностной обработке при температуре 80°C, наблюдалось в возрасте 28 дней. Также наблюдалось снижение прочности образцов, изготовленных с использованием вяжущего с соотношением цемента к шлаку 30:70, из-за увеличения водоцементного отношения. Оптимальным можно считать соотношение цемента к шлаку, равное 50:50.

Таблица 3

**Прочность бетона после тепловлажностной обработки
при разных температурах**

Качество тонкого граншлака, %	Вода/Вяжущие	Прочность сжатия, МПа			
		80°C		60°C	
		После обработки	28 дней	После обработки	28 дней
0	0.362	34.1	47.6	32.9	50.2
50	0.370	42.2	51.1	35.9	53.7
70	0.376	39.1	48.1	33.9	49.2

При использовании тонкомолотого граншлака в бетонных смесях целесообразно применять водоредуцирующие добавки. С другой стороны, большое значение имеет влияние добавки на параметры тепловлажностной обработки, такие как продолжительность выдержки бетона и скорость подъема температуры, в связи с тем, что суперпластификаторы влияют на время схватывания цементного теста, а именно могут замедлять гидратацию минеральных частиц [7]. В этих случаях количество добавок следует назначать с учетом влияния добавки на время схватывания цементного теста, а не исходя из максимального водоредуцирующего эффекта [8].

С увеличением количества водоредуцирующей добавки на основе поликарбоксилата начало и конец схватывания растягиваются, несмотря на снижение количества воды в тестах с равной подвижностью. Двухкомпонентная добавка с суперпластификатором на основе сульфонафталинформальдегида в количестве 50% и Na_2SO_4 в количестве 50% показала меньшее влияние на время схватывания цементных тест. Определение времени схватывания проводилось для цементного теста с соотношением цемента к шлаку 50:50 и показано на Рис. 1.

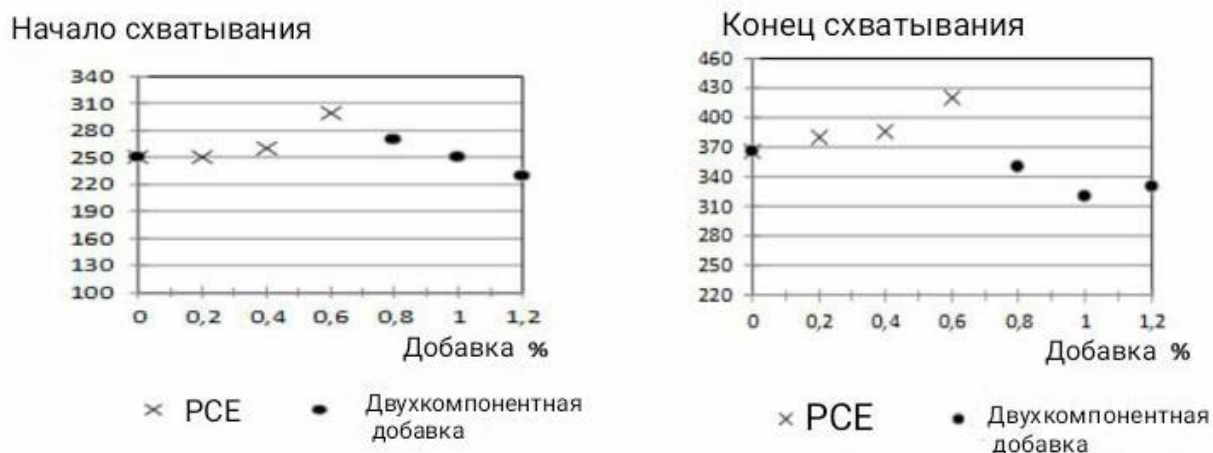


Рис.1. Влияние количества добавок на начало конец схватывания цементного теста

Многие исследователи показали, что количество суперпластификатора для получения цементных тест с идентичной подвижностью зависит от типа и дисперсности ультратонких минеральных наполнителей. Например, авторы работы [4] показали, что количество суперпластификатора в тестах граншлак-цемент с одинаковой подвижностью в значительной степени зависит от типа и количества наполнителей из граншлака, но не от дисперсности молотого шлака. Было установлено, что увеличение водоредуцирующего эффекта выбранной поликарбоксилатной добавки зависит как от типа граншлака, так и от его количества. Оптимальное количество граншлака, обеспечивающее максимальное увеличение водоредуцирующего эффекта добавки, составляет 50% от массы портландцемента [4].

Следовательно, использование оптимального количества граншлака, обеспечивающего максимальный водоредуцирующий эффект добавки, позволяет уменьшить количество воды, что способствует повышению ранней прочности бетона.

Снижение количества воды в растворах с 50 и 70 процентами граншлака при добавлении PCE в количестве 0,4% можно оценить в 19% и 13% соответственно, как показано в Таблице 4. Таким образом, оптимальное соотношение портландцемента к тонкомолотому гранулированному доменному шлаку было подтверждено и составило 50:50 для увеличения водоредуцирующего эффекта PCE.

Однако, часто используется цемент, содержащий до 70% граншлака. Соответственно, было изучено влияние добавок на раннюю прочность бетона на основе цемента с содержанием граншлака в количестве 70% в нормальных условиях твердения и после тепловлажностной обработки при температуре 60°C, как показано в Таблице 5.

Наиболее эффективной добавкой для повышения прочности бетона на основе цемента с содержанием граншлака 70% в возрасте 12 и 24 часов в нормальных условиях твердения является двухкомпонентная добавка с суперпластификатором на основе сульфонафталинформальдегида в количестве 50% и Na_2SO_4 в количестве 50%. Однако в условиях тепловлажностной обработки при 60°C как двухкомпонентная добавка, так и PCE обеспечивают увеличение прочности до 80%.

Таблица 4

Водоредуцирующий эффект (Вр) РСЕ и прочность на сжатие

Добавка, %	Диаметр расплава, мм	В/В	Кол-во воды, %	Прочность на сжатие, МПа		
				12 часов	24 часа	28 дней
Цемент, шлак = 30:70; хранение при 20-22°С						
-	106	0.48	-	1.4	3.6	29.4
PCE (0.4%)	107	0.42	13	1.6	4.0	45.8
Цемент, шлак =50:50; хранение при 20-22°С						
-	107	0.47	-	1.7	4.9	34.5
PCE (0.4%)	107	0.38	19	2.6	8.9	51.6

Таблица 5.

Кинетика твердения бетона

Добавка, %	В/В	Прочность на сжатие, МПа /%		
		12 часов	24 часа	28 дней
Хранение при 20-22°C				
-	0.48	<u>1.4</u> 100	<u>3.6</u> 100	<u>29.4</u> 100
Двухкомпонентная* (0.8%)	0.42	<u>1.9</u> 136	<u>4.3</u> 119	<u>44.9</u> 153
Двухкомпонентная* (1.6%)	0.37	<u>2.5</u> 179	<u>6.5</u> 180	<u>52.4</u> 178
PCE (0.4%)	0.42	<u>1.6</u> 114	<u>4.0</u> 111	<u>45.8</u> 156
После тепловлажностной обработки при 60°C				
-	0.47	<u>5.2</u> 100	<u>14.9</u> 100	<u>37.6</u> 100
Двухкомпонентная * (0.8%)	0.42	<u>9.6</u> 184	<u>17.2</u> 115	<u>45.8</u> 122
PCE (0.4%)	0.42	<u>9.5</u> 183	<u>18.4</u> 123	<u>46.9</u> 125

* Двухкомпонентная добавка — суперпластификатор на основе сульфонафталинформальдегида в количестве 50% и Na₂SO₄ в количестве 50%.

Заключение

В работе показано совокупное влияние факторов, способствующих повышению ранней прочности бетона на основе молотого гранулированного доменного шлака: температуры тепловлажностной обработки, использования водоредуцирующей добавки, ускорителя твердения, тонкости помола частиц шлака. Наиболее эффективной добавкой для повышения прочности бетона на основе цемента с содержанием граншлака 70% в возрасте 12 и 24 часов в нормальных условиях твердения является двухкомпонентная добавка, содержащая суперпластификатор на основе сульфонафталинформальдегида в количестве 50% и Na₂SO₄ в количестве 50%. Однако в условиях тепловлажностной обработки при 60°C как двухкомпонентная добавка, так и РСЕ обеспечивают увеличение прочности до 80%.

Список литературы

1. Kazanskaya, L. F., Smirnova, O. M. Technological approaches to increase the quality of lightweight concrete based on hybrid binders // IOP Conference Series: Materials Science

- and Engineering. 2019. Vol. 666, No. 1. P. 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/666/1/012038>
2. Kazanskaya, L. F., Smirnova, O. M., Palomo, Á., Menendez Pidal, I., Romana, M. Supersulfated Cement Applied to Produce Lightweight Concrete // Materials. 2021. 14(2). P. 403. <https://doi.org/10.3390/ma14020403>
 3. Smirnova, O., Kazanskaya, L., Koplik, J., Tan, H., Gu, X. Concrete Based on Clinker-Free Cement: Selecting the Functional Unit for Environmental Assessment // Sustainability. 2021. 13(1). P. 135. <https://doi.org/10.3390/su13010135>
 4. Smirnova, O. M., Potyomkin, D. A. Influence of ground granulated blast furnace slag properties on the superplasticizers effect // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. 9(7). Pp. 874-880. EDN: YBLPUT
 5. Jiang, W., Alkali-activated Cementitious Materials: Mechanism, Microstructure and Properties. Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, US, 1997.
 6. Singh, N., Rai, S. and Singh, N.B. Effect of sodium sulphate on the hydration of granulated blast furnace blended Portland cement // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2001. 8(2). Pp. 110-113
 7. Kazanskaya, L., Smirnova, O. Influence of mixture composition on fresh concrete workability for ballastless track slabs // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 157. 06022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706022>
 8. Kazanskaya, L. Estimation of Portland cement reduction using polycarboxylate based admixture // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_62

References

1. Kazanskaya, L. F., Smirnova, O. M. Technological approaches to increase the quality of lightweight concrete based on hybrid binders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 666, No. 1. P. 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/666/1/012038>
2. Kazanskaya, L. F., Smirnova, O. M., Palomo, Á., Menendez Pidal, I., Romana, M. Supersulfated Cement Applied to Produce Lightweight Concrete // Materials. 2021. 14(2). P. 403. <https://doi.org/10.3390/ma14020403>
3. Smirnova, O., Kazanskaya, L., Koplik, J., Tan, H., Gu, X. Concrete Based on Clinker-Free Cement: Selecting the Functional Unit for Environmental Assessment // Sustainability. 2021. 13(1). P. 135. <https://doi.org/10.3390/su13010135>
4. Smirnova, O. M., Potyomkin, D. A. Influence of ground granulated blast furnace slag properties on the superplasticizers effect // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. 9(7). Pp. 874-880. EDN: YBLPUT
5. Jiang, W., Alkali-activated Cementitious Materials: Mechanism, Microstructure and Properties. Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, US, 1997.
6. Singh, N., Rai, S. and Singh, N.B. Effect of sodium sulphate on the hydration of granulated blast furnace blended Portland cement // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2001. 8(2). Pp. 110-113
7. Kazanskaya, L., Smirnova, O. Influence of mixture composition on fresh concrete workability for ballastless track slabs // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 157. 06022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706022>
8. Kazanskaya, L. Estimation of Portland cement reduction using polycarboxylate based admixture // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_62