

Academia. Архитектура и строительство, № 2, стр. 177–181.

Academia. Architecture and Construction, no. 2, pp. 177–181.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 691.3

DOI: 10.22337/2077-9038-2025-2-177-181

Исследование физико-механических процессов, происходящих в бетонах специального назначения, модифицированных при помощи вторичного использования отходов промышленного производства

Соколова Светлана Владимировна (Самара). Кандидат технических наук, доцент. Приволжский государственный университет путей сообщения (Россия, 443066, ул. Свободы, 2 В. ПривГУПС). Эл. почта: sokolova9967@mail.ru

Сидоренко Юлия Викторовна (Самара). Кандидат технических наук. Самарский государственный технический университет (Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ). Эл. почта: sm-samgasa@mail.ru

Аннотация. В работе, по результатам которой написана статья, проводилась структурная модификация лёгких жаростойких бетонов на жидком стекле с использованием отходов промышленных производств: отработанного катализатора ИМ-2201, и фосфорного шлака, и испытания по пределу прочности на сжатие и по теплопроводности. Показаны положительные результаты. Полученные материалы удовлетворяют требованиям по их использованию в качестве теплоизоляционных в промышленных тепловых агрегатах. Кроме того, использование отходов местных промышленных производств позволяет получить экономический эффект и решать вопросы экологической составляющей.

С помощью промышленных отходов гранулированного шлака был разработан состав гипсобетона для стеновых панелей гражданских зданий. С целью защиты коррозии арматуры в гипсобетоне проводились испытания с помощью лабораторного рН-метра ЛПУ-01 и трёхконтурного прецизионного потенциометрического стола типа УКА с целью измерения электродных потенциалов. Было выявлено, что лучшими защитными свойствами обладает гипсобетон с добавкой к гипсу – 10% негашёной извести и 10% шлака.

Ключевые слова: жаростойкие бетоны, гипсобетоны, высокопрочный гипс, отходы промышленных производств, фосфорный шлак, жидкое стекло, тонкомолотые добавки

Для цитирования. Соколова С.В., Сидоренко Ю.В. Исследование физико-механических процессов, происходящих в бетонах специального назначения, модифицированных при помощи вторичного использования отходов промышленного производства // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – № 2. – С. 177–181. – DOI: 10.22337/2077-9038-2025-2-177-181.

The Study of Physical and Mechanical Processes Occurring in Special-Purpose Concretes Modified by Secondary Use of Industrial Wastes

Sokolova Svetlana V. (Samara). Candidate of Sciences in Technology, Docent. Volga State Technical University (2B, Svobody Str., Samara, 443066, Russia. VSTU). E-mail: sokolova9967@mail.ru

Sidorenko Yulia V. (Samara). Candidate of Sciences in Technology. Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia. SSTU). E-mail: sm-samgasa@mail.ru

Abstract. The expansion of modern industrial production is associated with the formation of high-tonnage waste. Solving issues related to the problem of waste disposal helps reduce the cost of building materials and frees up agricultural land by eliminating

slag dumps. Some industrial wastes can be used as raw materials for the manufacture of special building materials, in particular, for the manufacture of heat-resistant concrete and gypsum concrete panels. High-strength gypsum is a very effective material due to the simplicity of its production technology, the simple method of obtaining high-strength building products from this, as well as the low density of gypsum products and low thermal and sound conductivity. In order to improve the physical and mechanical characteristics of special concretes (heat-resistant concrete and gypsum concrete), industrial waste was used as an additive, in particular phosphorus slag from the Tolyatti plant of JSC Phosphorus.

Keywords: heat-resistant concretes, gypsum concrete, high-strength gypsum, industrial waste, phosphoric slag, liquid glass, finely ground additives

For citation. Sokolova S.V., Sidorenko Y.V. The Study of Physical and Mechanical Processes Occurring in Special-Purpose Concretes Modified by Secondary Use of Industrial Wastes. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2025,, no. 2, pp. 177–181, doi: 10.22337/2077-9038-2025-2-177-181.

Главным направлением оптимизации технологического процесса современного строительного комплекса является возможность применения эффективных строительных материалов, снижения материалоемкости, повышения механизации и индустриализации строительства. Весьма актуальным является увеличение эксплуатационных характеристик изделий, внедрение безотходных технологий в производство, использование отходов промышленных производств, что создаёт благоприятные условия для уменьшения загрязнения окружающей среды от загрязнений окружающей среды.

В связи с увеличением строительства промышленных предприятий происходит значительное увеличение использования железобетонных конструкций.

Модификация лёгких жаростойких композитов

Применение жаростойких бетонов позволяет коренным образом решить вопрос комплексной механизации производства работ при возведении тепловых агрегатов [1–4].

Жаростойкий бетон на жидком стекле является одним из уникальных материалов, широкое распространение и эффективность которого определяются, прежде всего, высокой термической стойкостью и простотой технологии изготовления [6–7].

После проведения лабораторных исследований по выбору жаростойкого вяжущего для теплоизоляции печей был применён лёгкий крупнопористый бетон на основе особолёгкого керамзитового гравия (М150-200). Крупнопористый жаростойкий бетон на жидком стекле содержал в своём составе тонкомолотый обезжелезненный компонент – отработанный алюмохромистый отход ИМ-2201 с Новокуйбышевского нефтехимкомбината, отвердителем служил молотый фосфорный шлак, содержащий силикаты кальция с комбината ОАО «Фосфор» (город Тольятти Самарской области).

Физико-термические показатели жаростойкого крупнопористого бетона представлены в таблице 1.

Модификация гипсобетона

Особое внимание уделяется развитию производства местных строительных материалов, среди которых гипсовые вяжущие занимают одно из первых мест.

Объективным условием для их дальнейшего развития являются многочисленные богатые месторождения гипсового камня, позволяющие почти повсеместно развивать производство и использовать гипс во многих отраслях народного хозяйства и в первую очередь – в строительстве [5].

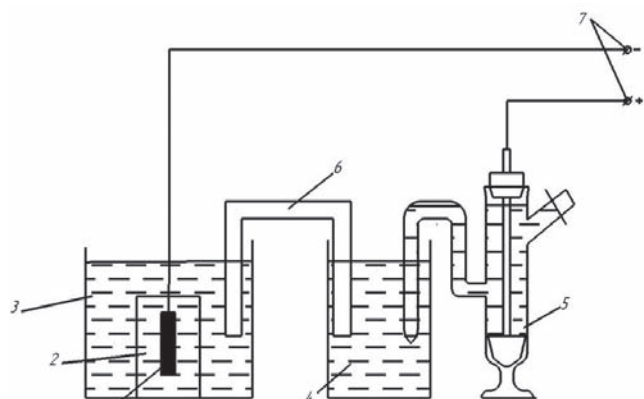
Таблица 1. Физико-термические свойства жаростойкого теплоизоляционного керамзитобетона

№ состава	Средняя плотность бетона в сухом состоянии, кг/м³	Состав бетона, кг/м³	Коэффициент теплопроводности λ (Вт /м· °С) в сухом состоянии	Предел прочности при сжатии (МПа) после обжига при t = 600 °С	Коэффициент теплопроводности λ (Вт /м· °С) при t = 600 °С
1	400	Керамзитовый гравий М200-180; Отработанный катализатор ИМ-2201 – 120 Фосфорный шлак – 12 Жидкое стекло –105	0,146	1,5	0,31
2	600	Керамзитовый гравий М200-190 Отработанный катализатор ИМ-2201 – 120 Диатомитовый песок – 140 Фосфорный шлак – 12 Жидкое стекло – 160	0,230	2,8	0,48

Примечание: жидкое стекло во всех составах применялось натриевое, плотность ρ=1,34–1,36 г/см³.

Таблица 2. Составы гипсобетонных образцов

№№	Наименование материалов	Содержание компонентов (в вес. процентах) в составах			
		1	2	3	4
1	Высокопрочный гипс	80	55	50	100
2	Негашёная молотая известь	10	5	–	–
3	Гранулированный шлак	10	40	50	–



1 – стальной электрод; 2 – гипсобетонный образец; 3 – сосуд с водой; 4 – насыщенный раствор KCl; 5 – каломельный электрод; 6 – ионный мостик; 7 – клеммы потенциометрического стола типа УКА

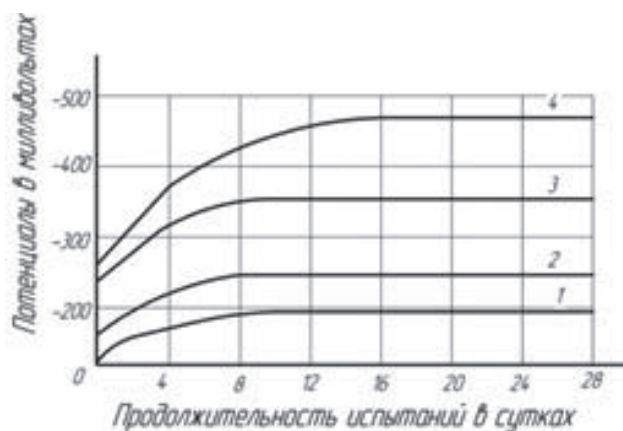
Рис. 1¹. Измерение электродных потенциалов

Рис. 2. Измерение потенциалов стали в гипсобетоне составов 1, 2, 3, 4 (источник: _____)

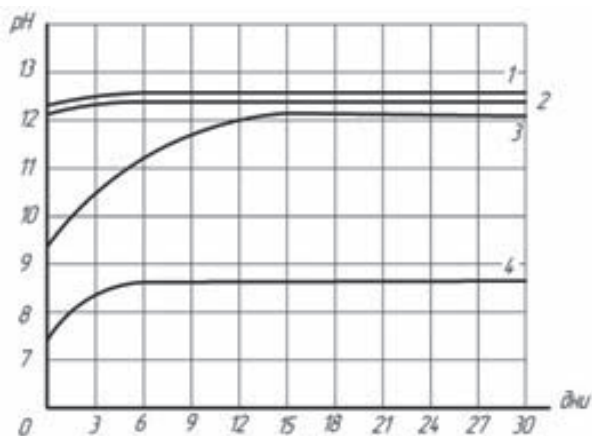


Рис. 3. Изменение pH в гипсобетоне составов 1, 2, 3, 4

В качестве добавки в гипсобетон были приняты негашёная молотая известь с содержанием $(CaO + MgO) - 82 \%$, и гранулированный фосфорный шлак-отход с химического завода в городе Тольятти.

Для исследования защитных свойств добавки указанных материалов были изготовлены четыре серии гипсобетонных образцов, составы которых приведены в таблице 2.

После изготовления образцы высушивались в сушильном шкафу при температуре $55^\circ C$ до наименьшего веса, а после этого хранились в условиях высокой относительной влажности воздуха равной 80% .

Такие условия являются жёсткими для арматуры, поэтому испытания через месяц после изготовления образцов уже дали возможность судить об эффективности добавки извести и шлака.

Образцами для измерения потенциала служили гипсовые кубики с ребром 40 мм , в которые закладывались стальные электроды.

Измерение электродных потенциалов производилось с помощью лабораторного pH-метра ЛПУ-01 и трёхконтурного прецизионного потенциометрического стола типа УКА, представленных на рисунке 1. Этот стол позволяет измерять с высокой точностью малые напряжения постоянного тока.

Значения электродных потенциалов стали и гипсобетона приведены на рисунке 2.

Из графика (см. рис. 2) видно, что лучшими защитными свойствами обладает гипсобетон состава 1, в котором потенциал стали равен 125 мВ . Затем следуют составы 2; 3 и 4 с потенциалами соответственно 250 ; 360 и 475 мВ .

Для измерения pH водных вытяжек из гипсобетонов изготавливались образцы размером $20 \times 20 \times 20 \text{ мм}$.

На рисунке 3 представлен график измерения pH различных составов гипсобетона во времени.

Наибольшее значение $pH = 12,40$ наблюдается у состава 1.

У состава 2 $pH = 12,20$; pH состава 3 (гипс + шлак) также увеличилось по сравнению с чистым гипсом ($11,1$ против $8,0$).

Коррозия определялась по весовым потерям на стальных пластинках, которые закладывались в гипсобетонные образцы размером $16 \times 40 \times 40 \text{ мм}$.

Результаты весовых испытаний также показали, что коррозия стали в гипсобетоне состава 1 отсутствует.

В составах 2, 3 и 4 коррозия составляет соответственно $2,5$; $3,4$ и $8,0 \text{ г/м}^2$ в месяц.

¹ Статья проиллюстрирована авторскими рисунками.

Таблица 3. Сводная таблица результатов испытаний коррозии стали в гипсобетоне с добавками извести и шлака

Составы №№	Электродные потенциалы стали (мВ)	рН	Коррозия		Предел прочности при сжатии (кг/см ²)
			потеря в весе (г/м ²)	по внешнему виду	
1	–125	12,40	0	Коррозия отсутствует	373
2	–250	12,20	2,5	Небольшая коррозия пятнами	320
3	–360	11,1	3,4	Значительная коррозия пятнами	295
4	–475	8,0	8,5	Сильная сплошная коррозия	364

Для всех составов определялся предел прочности при сжатии на образцах размером 70×70×70 мм.

Результаты испытаний приведены в таблице 3, из которой следует, что наибольшая прочность наблюдается у гипсобетона 1 состава.

Таким образом, наилучшую защиту арматуры обеспечивает состав 1 (добавки к гипсу – 10% негашёной извести и 10% шлака).

Наряду с этим происходит небольшое увеличение прочности (378 кг/см² против 364 кг/см² для чистого гипса).

Добавка извести и шлака наряду с защитой арматуры от коррозии позволяет вместо дефицитного высокопрочного гипса использовать отходы производства, каковым в данном случае является шлак.

Заключение

В настоящее время многие промышленные предприятия нуждаются в безотходных технологиях, образующиеся в их структурах попутные продукты должны перерабатываться в материалы, которые будут использованы в производстве строительной продукции.

Фосфорный шлак – отход, образовавшийся на предприятии тольяттинского комбината ОАО «Фосфор», в тонкодисперсном состоянии возможно использовать в качестве химического отвердителя жаростойких вяжущих на жидком стекле, а также в качестве добавки в гипсобетон.

Введение данного материала в состав лёгкого жаростойкого бетона позволило улучшить его физико-термические показатели; также применение фосфорного шлака в составах гипсобетона, предназначенного для изготовления стеновых панелей, увеличило защиту арматуры в изделиях и прочностные показатели гипсобетона.

Список источников

1. Тарасова, А.П. Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе / А.П. Тарасова. – Москва : Стройиздат, 1982. – 133 с. – Текст: непосредственный.
2. Рахимов, Р.З. Экология, научные достижения и инновации в производстве строительных материалов на основе

и с применением техногенного сырья / Р.З. Рахимов, У.Х. Магдеев, В.Н. Ярмаковский. – Текст: непосредственный // Строительные материалы. – 2009. – № 11. – С. 8–12.

3. Current Sustainable Trends of Using Waste Materials in Concrete : A Decade Review / M. Sandanayake, Y. Bouras, R.J. Haigh, Z. Vrcelj. – DOI: 10.3390/su12229622. – Текст : электронный // Sustainability. – 2020. – Vol. 12 (22). – P. 9622. – URL: https://www.researchgate.net/publication/347051227_Current_Sustainable_Trends_of_Using_Waste_Materials_in_Concrete (дата обращения 24.09.2024). (In Engl.)

4. Рахимова, Н.Р. Композиционные шлакощелочные вяжущие, растворы и бетоны на их основе / Н.Р. Рахимова. – Текст: непосредственный // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2008. – № 4 (12). – С. 110–118.

5. Передерий, И.А. Исследование коррозии стали в гипсобетоне на высокопрочном гипсе и электрохимическая защита / И.А. Передерий, В.П. Фёдоров. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1967. – № 3. – С. 20–25.

6. Соколова, С.В. Получение эффективных материалов на основе отходов сернокислотной промышленности / С.В. Соколова, Ю.В. Сидоренко. – Текст : непосредственный // Вестник НИЦ Строительство. – 2024. – № 2 (41). – С. 131–147.

7. Соколова, С.В. Ремонт футеровок тепловых агрегатов жаростойкими композитами с помощью пропиточно-обмазочных технологий на основе отходов промышленных производств / С.В. Соколова, Ю.А. Холопов, Ю.В. Сидоренко – Текст: непосредственный // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1 (58). – С. 4–11.

8. Рахимова, Н.Р. Композиционные шлакощелочные вяжущие с минеральными добавками различного типа активности / Н.Р. Рахимова, Р.З. Рахимов. – Текст: непосредственный // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2013. – № 16. – С. 204–216.

9. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И. Логанина. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений.

Строительство. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 42–45.

10. Бикбау, М.Я. Развитие технологии бетонов с применением наноцементов и дисперсных заполнителей / М.Я. Бикбау, А.С. Нефёдов, Е.В. Панкратова. – Текст: непосредственный // Технологии бетонов. – 2023. – № 4 (189). – С. 55–63

References

1. Tarasova A.P. Zharostoikie vyazhushchie na zhidkom stekle i betony na ikh osnove [Heat-Resistant Binders on Liquid Glass and Concretes on Their Basis]. Moscow, Stroizdat Publ., 1982, 133 p. (In Russ.)

2. Rakhimov R.Z., Magdeev U.Kh., Yarmakovskii V.N. Ekologiya, nauchnye dostizheniya i innovatsii v proizvodstve stroitel'nykh materialov na osnove i s primeneniem tekhnogennogo syr'ya [Ecology, Scientific Achievements and Innovations in the Manufacture of Building Materials on the Basis and with the Use of Technogenic Raw Materials]. In: *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2009, no. 12, pp. 8–11 (In Russ., abstr. in Engl.)

3. Sandanayake M., Bouras Y., Haigh R.J., Vrcelj Z. Current Sustainable Trends of Using Waste Materials in Concrete – A Decade Review. In: *Sustainability*, 2020, Vol. 12 (22), P. 9622. DOI: 10.3390/su12229622. URL: <https://clck.ru/3LVSNT> (Accessed 09/24/2024). (In Engl.)

4. Rakhimova N.R. Kompozitsionnye shlakoshchelochnye vyazhushchie, rastvory i betony na ikh osnove [Compositional Slag-Alkaline Binders, Mortars and Concretes on Their Base]. In: *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Architecture and civil engineering. Construction and Architecture], 2008, no. 4 (12), pp. 110–118. (In Russ., abstr. in Engl.)

5. Perederii I.A., Fedorov V.P. Issledovanie korrozii stali v gipsobetone na vysokoprochnom gipse i elektrokhimicheskaya zashchita [Study of Steel Corrosion in Gypsum Concrete on High-Strength Gypsum and Electrochemical Protection]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of

Higher Educational Institutions. Construction and Architecture], 1967, no. 3, pp. 20–25. (In Russ.)

6. Sokolova, S.V., Sidorenko Yu.V. Poluchenie effektivnykh materialov na osnove otkhodov sernokislotnoi promyshlennosti [Production of Effective Materials on the Basis of Sulfuric Acid Industry Wastes]. In: *Vestnik NITs Stroitel'stvo* [Bulletin of the Scientific Research Center Construction], 2024, no. 2 (41), pp. 131–147. (In Russ., abstr. in Engl.)

7. Sokolova S.V., Kholopov Yu.A., Sidorenko Yu.V. Remont futerovok teplovykh agregatov zharostoikimi kompozitami s pomoshch'yu propitochno-obmazochnykh tekhnologii na osnove otkhodov promyshlennykh proizvodstv [Repair of Linings of Thermal Units by Heat-Resistant Composites Using Impregnating and Coating Technologies Based on Industrial Waste]. In: *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional Architecture and Engineering], 2024, no. 1 (58), pp. 4–11. (In Russ., abstr. in Engl.)

8. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Kompozitsionnye shlakoshchelochnye vyazhushchie s mineral'nymi dobavkami razlichnogo tipa aktivnosti [Composite Slag-Alkaline Binders with Mineral Additives of Various Types of Activity]. In: *Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya Rossiiskoi akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk* [Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences], 2013, no. 16, pp. 204–216. (In Russ., abstr. in Engl.)

9. Loganina V.I. Kvoprosu o regulirovanii tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva betona [On the Regulation of Technological Processes of Concrete Production]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* [News of higher Educational Institutions. Construction], 2009, no. 3–4 (603–604), pp. 42–45. (In Russ., abstr. in Engl.)

10. Bikbau M.Ya., Nefedov A.S., Pankratova E.V. Razvitie tekhnologii betonov s primeneniem nanocementov i dispersnykh zapolnitelei [Concrete Technology Development with the Use of Nanocements and Dispersed Aggregate]. In: *Tekhnologii betonov*, 2023, no. 4 (189), pp. 55–63. (In Russ., abstr. in Engl.)