

М.Ю. ТИТОВ, канд. техн. наук, Л.А. ТИТОВА, канд. техн. наук,
М.И. БЕЙЛИНА, инженер-технолог

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона –
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, АО «НИЦ «Строительство», лаборатория № 7 самонапряженных конструкций и напрягающих бетонов
(109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, к. 5)

Применение промышленных отходов для получения расширяющих компонентов

Возможность получить строительные материалы с высокими физико-механическими характеристиками привлекала ученых и практиков в поиске применения дешевых отходов промышленности, что позволило бы снизить материало- и энергоемкость, получив материалы с заданными свойствами. Доменные и металлургические шлаки для решения этих задач представляют особый интерес, так как они характеризуются прогнозируемым химическим составом и экологически безопасны. Современный уровень развития технологии бетона предполагает широкое использование различных добавок в бетон. Применение добавок справедливо считается одним из самых универсальных, доступных и гибких способов управления технологическими параметрами строительных материалов. В результате использования расширяющих добавок можно добиться улучшения структурных характеристик бетонов, снижения усадочных деформаций, ускорения темпов нарастания прочности, повышения долговечности. В конечном итоге возможно качественно улучшить строительно-технические свойства конструкции.

Ключевые слова: доменные гранулированные шлаки, расширяющая добавка, напрягающий бетон, бетон с компенсированной усадкой, прочность, самонапряжение, водонепроницаемость.

Для цитирования: Титов М.Ю., Титова Л.А., Бейлина М.И. Применение промышленных отходов для получения расширяющих компонентов // *Бетон и железобетон*. 2022. № 6 (614). С. 33–37.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-33-37>

M.Yu. TITOV, Candidate of Sciences (Engineering), L.A. TITOVA, Candidate of Sciences (Engineering), M.I. BEYLINA, Engineer-Techologist
Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev
(6, bldg. 5, 2nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Application of Industrial Waste for the Production of Expansion Components

The opportunity to obtain building materials with high physical and mechanical characteristics attracted scientists and practitioners in the search for the use of cheap industrial waste, which would reduce material and energy consumption, having obtained materials with the specified properties. Blast-furnace and metallurgical slags are of particular interest for solving these problems, since they are characterized by a predictable chemical composition and are environmentally friendly. The current level of development of concrete technology involves the widespread use of various additives in concrete. The use of additives is rightly considered as one of the most versatile, affordable and flexible ways to control the technological parameters of building materials. As a result of the use of expansion additives, it is possible to improve the structural characteristics of concrete, reduce shrinkage deformations, accelerate the rate of strength increase, and increase durability. Ultimately, it is possible to qualitatively improve the construction and technical properties of the structure.

Keywords: blast-furnace granular slags, expansion additive, self-stressing concrete, concrete with compensated shrinkage, strength, self-stress, watertightness.

For citation: Titov M.Yu., Titova L.A., Beylina M.I. Application of industrial waste for the production of expansion components. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 6 (614), pp. 33–37. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-33-37>

Интенсивное развитие строительства и создание конструкций, обладающих высокой прочностью и долговечностью, поставило задачу расширения применения не только портландцемента общестроительного назначения, но и специальных цементов и бетонов на их основе.

При возведении и эксплуатации зданий и сооружений серьезной проблемой является предотвраще-

ние отрицательных последствий усадочных деформаций.

Поиски, направленные на снижение усадки в середине XX в., привели к созданию напрягающих цементов. В процессе твердения бетона с использованием этих цементов вместо традиционной усадки происходит расширение бетона, уплотняется структура и увеличивается прочность, водонепроницаемость

и долговечность конструкций. Для обеспечения этих характеристик бетонов используются минеральные добавки, среди которых особое место занимают расширяющие добавки, при использовании которых улучшаются показатели проницаемости, растяжения при изгибе и снижаются величины усадки.

Напрягающий бетон может приготавливаться как при применении напрягающего цемента, так и композитного вяжущего: портландцемента и расширяющего компонента, вводимого как составляющее при приготовлении бетона.

Расширяющие добавки, вводимые при приготовлении бетона в бетоносмеситель, упрощают технологию и позволяют получить материал с регулируемыми свойствами [1, 2].

В России разработана большая гамма расширяющих добавок, среди которых особое место занимают алюминатно-сульфатные, механизм твердения которых наиболее изучен при разработке спеццементов.

В основных работах по анализу природы расширения [3–5] утверждается, что расширение цементного камня является следствием роста кристаллов этtringита – ГСАК ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) в

определенный период развития кристаллизационной структуры твердеющего цементного камня. При продолжительном росте кристаллов ГСАК процесс сбалансированного твердения портландцемента проходит параллельно процессу расширения алюминатной составляющей при взаимодействии с гипсом.

По мнению ряда ученых [1–3], ГСАК образует тонкие оболочки вокруг гидратирующихся цементных зерен, способных создавать разности концентраций растворов в капиллярном пространстве. При этом определенную роль играет химический состав портландцемента. Этtringит, образующийся при высокой концентрации извести, предопределяет расширение структуры. Образование ГСАК происходит в структуре, склонной к пластическим деформациям, при этом происходит уплотнение порового пространства кристаллами ГСАК, что способствует образованию непроницаемого плотного материала.

В шлаках металлургических заводов содержание оксида Al_2O_3 колеблется от 7 до 30%. Такие шлаки могут быть использованы для выпуска расширяющих добавок, как простых по составу, так и многокомпонентных. Использование шлаков различного

Таблица 1
Table 1

Химический состав исходных материалов
Chemical composition of initial materials

Наименование материала	Содержание оксидов, %							
	Al_2O_3	SO_3	SiO_2	Fe_2O_3	MgO	CaO	TiO_2	R_2O
Молотый доменный гранулированный шлак	24,8	3,7	34,7	0,86	6,8	38,6	2,74	1,3
Гипсовый камень	0,78	48,7	4,3	0,76	2,84	28,9	–	–

Таблица 2
Table 2

Прочность мелкозернистых бетонов на основе добавки доменного шлака Нижнетагильского металлургического завода
Strength of fine-grained concrete based on the addition of blast-furnace slag from the Nizhny Tagil Metallurgical Plant

№ п/п	Состав, %		Содержание, %		Прочность при сжатии, МПа в возрасте, сут			
	Шлак	Гипс	Al_2O_3	SO_3	3	7	14	28
1	50	50	12,4	24,35	24,7	32	33,7	36
2	60	40	14,9	19,48	27,1	34,6	36,7	39,7
3	65	35	16,12	17	29,4	32	41,4	47,6
4	70	30	17,36	14,6	31	36,7	44,8	50,4

Таблица 3
Table 3

Самонапряжение и расширение мелкозернистого бетона с расширяющей добавкой
Self-stressing and expansion of fine-grained concrete with an expansion admixture

№ п/п	Состав, %		Содержание, %		Самонапряжение, сут, МПа				Расширение, сут, МПа			
	Шлак	Гипс	Al_2O_3	SO_3	3	7	14	28	3	7	14	28
1	50	50	12,4	24,35	0,85	0,96	1	1,13	0,5	0,76	0,9	1,04
2	60	40	14,9	19,48	0,63	0,98	1,07	1,09	0,45	0,54	0,69	0,7
3	65	35	16,12	17	0,61	1,12	1,42	1,84	0,36	0,5	0,6	0,65
4	70	30	17,36	14,6	0,6	1,15	1,62	1,74	0,29	0,36	0,46	0,47

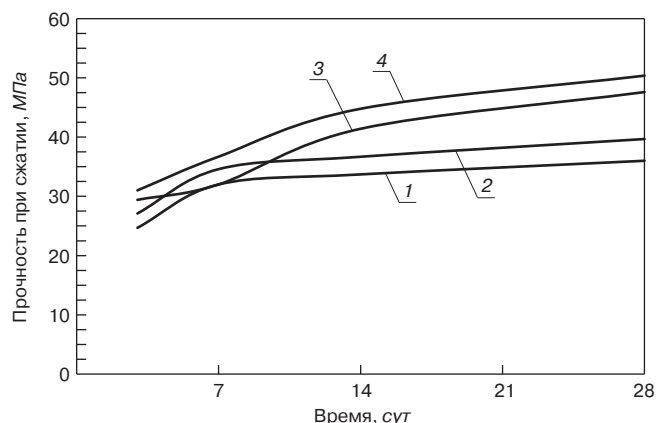


Рис. 1. Прочность при сжатии составов 1–4
Fig. 1. Compressive strength of compositions 1–4

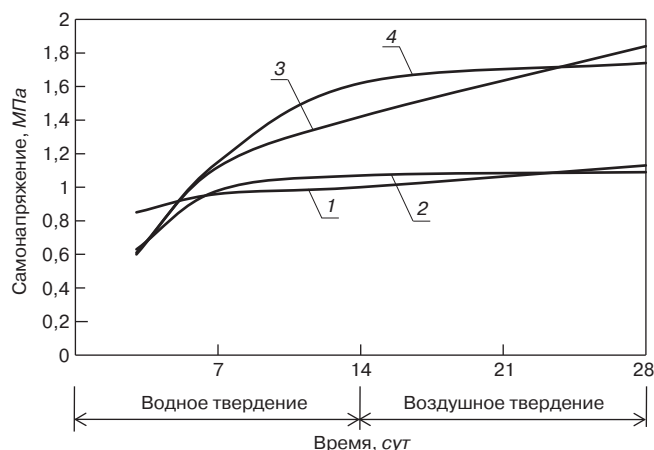


Рис. 2. Самонапряжение мелкозернистого бетона составов 1, 2, 3 и 4
Fig. 2. Self-stressing of fine-grained concrete of compositions 1, 2, 3 and 4

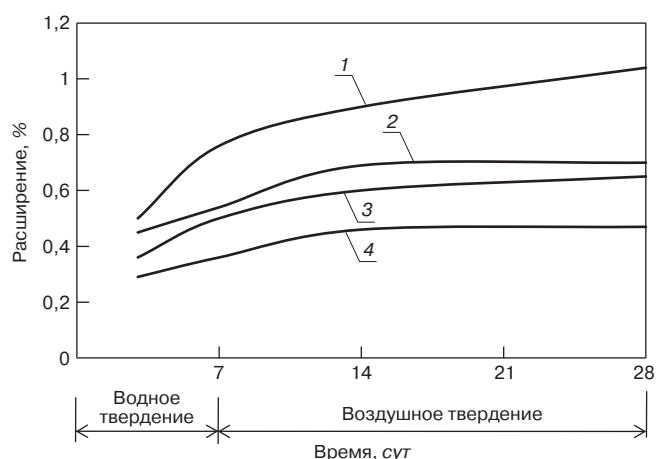


Рис. 3. Расширение мелкозернистого бетона составов 1, 2, 3 и 4
Fig. 3. Expansion of fine-grained concrete of compositions 1, 2, 3 and 4

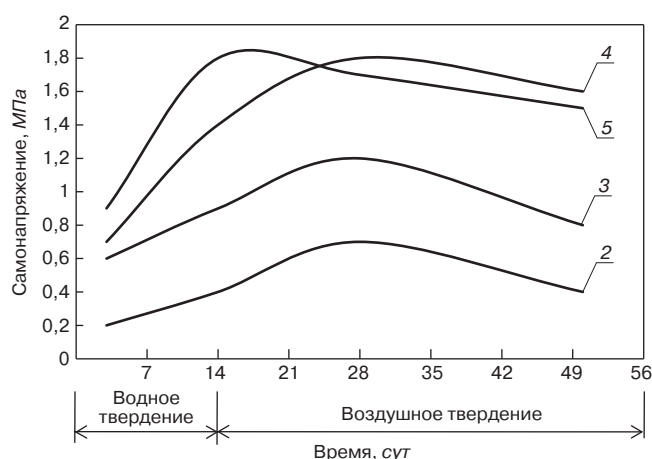


Рис. 4. Самонапряжение бетона составов 2, 3, 4 и 5
Fig. 4. Self-stressing of concrete compositions 2, 3, 4 and 5

химического состава (по содержанию оксида Al_2O_3) позволит в различных регионах РФ получить расширяющие добавки широкого диапазона.

Для проведения исследований и получения напрягающих бетонов в качестве алюмосодержащего компонента РД был выбран доменный шлак Нижнетагильского завода с повышенным содержанием Al_2O_3 – 24,6%.

В качестве сульфатного составляющего был выбран двухводный гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ с содержанием SO_3 – 48,7%).

Химический состав применяемых материалов представлен в табл. 1.

На данных материалах проводилась работа по определению количественного соотношения содержания шлака и гипса для получения расширяющих добавок по ТУ 5743-023-468540–90 для бетонов как напрягающих, так и с компенсированной усадкой.

В молотом гранулированном шлаке Нижнетагильского завода содержится оксида Al_2O_3 более 20%, поэтому расширяющая добавка была получена простым смешиванием или при помоле шлаков с гипсом. По-

лученная расширяющая добавка имела тонкость помола не менее $3500 \text{ см}^2/\text{г}$, т. е. в пределах значений величины удельной поверхности портландцемента.

Согласно ТУ на расширяющую добавку, контроль физико-механических показателей проводился на мелкозернистом бетоне.

Результаты оценки физико-механических свойств представлены в табл. 3 и 4 и на рис. 1–3.

Из результатов, представленных в табл. 2, видно, что для шлаков этого завода использование равного количества шлака и гипса (50:50) снижает прочность при сжатии и увеличивает деформации расширения (образцы слабые, пористые).

Наиболее оптимальным соотношением содержания шлака и гипса возможно считать соотношение 65:35 (шлак:гипс) при обеспечении значений прочности 47,6 МПа.

Величину самонапряжения определяли в возрасте 28 сут.

Развитие самонапряжения и расширения бетона при варьировании соотношения шлака и гипса 65:35 представлено в табл. 3 и на рис. 2 и 3.

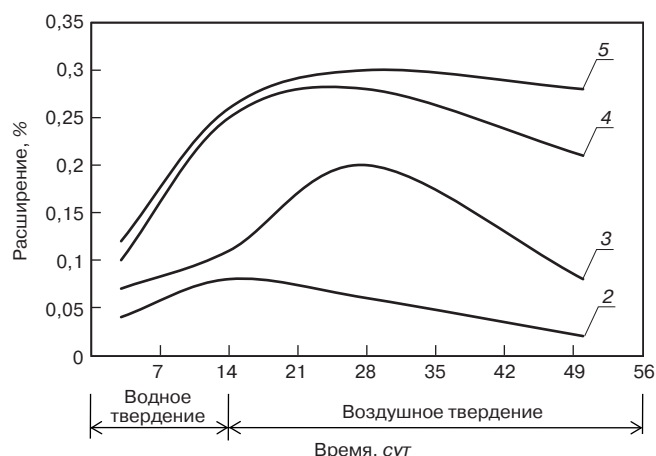


Рис. 5. Расширение бетона составов 2, 3, 4 и 5

Fig. 5. Expansion of concrete compositions 2, 3, 4 and 5

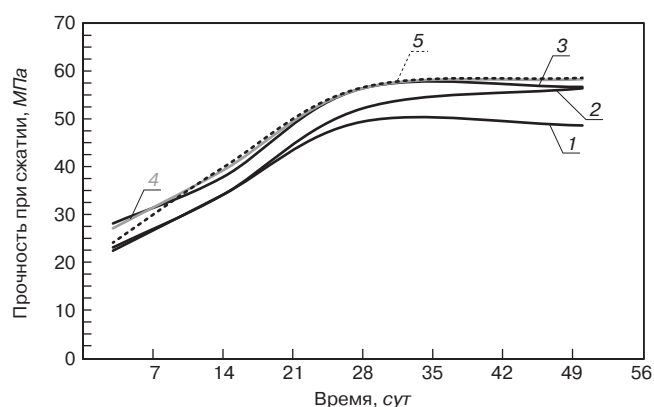


Рис. 6. Прочность при сжатии бетона составов 2, 3, 4 и 5

Fig. 6. Compressive strength of concrete compositions 2, 3, 4 and 5

При развитии самонапряжения 1,74 МПа и стабилизации расширения на 14-е сут в данной пробе расширяющей добавки количество Al_2O_3 составляет 16,1%, оксидов серы SO_3 – 17%, что позволяет получить расширяющую добавку с величиной самонапряжения до 2 МПа.

Как видно из таблиц, кинетика развития самонапряжения этого состава находится в соответствии с развитием расширения и прочности.

Для оценки возможности получения различных видов бетонов и регулирования их свойств рассма-

тривалось влияние добавки на физико-механические показатели.

В настоящем исследовании анализировались равнопрочные бетоны с расходом вяжущего 330 кг/м³ с использованием ПЦ500Д0Н ОАО «Мальцовский портландцемент» и расширяющие добавки на основе доменных гранулированных шлаков ПАО «Северсталь».

Нормируемые показатели таких бетонов представлены в табл. 4 и на рис. 4–6.

Результаты испытаний, представленных в табл. 4, показали, что для получения бетонов с компенсированной усадкой с применением шлаков с повышенным (более 20%) содержанием Al_2O_3 достаточно вводить 5–8% такой добавки. При этом деформации расширения в возрасте 14 сут достигли 0,2 и 0,08% при твердении на воздухе.

Из анализа результатов испытаний видно, что для получения напрягающего бетона необходимо вводить не более 12% расширяющей добавки этого типа. При этом величина самонапряжения повышается до 2 МПа (по требованию ТУ), а в возрасте 50 сут в воздушно-сухих условиях происходит снижение самонапряжения на 15% без снижения прочности.

При введении 8% добавки величина самонапряжения на 14-е сут достигает 1,8 МПа, при ее снижении в возрасте 50 сут (в условиях воздушно-влажного твердения) на 11%. Прочность незначительно увеличивается.

Проведенные исследования показали, что на основе молотого гранулированного шлака с содержанием Al_2O_3 свыше 20% могут быть получены напрягающие бетоны и бетоны с компенсированной усадкой класса до В40 с водонепроницаемостью до W20 и компенсацией усадочных деформаций. При этом количество расширяющей добавки варьировалось от 5 до 15%.

Применение напрягающих бетонов с использованием доменных шлаков позволит значительно расширить область их применения и решить следующие задачи:

– повысить эксплуатационные характеристики бетонов;

Таблица 4
Table 4

Изменения свойств бетонов в зависимости от количества РД
Changes in the properties of concrete depending on the number of RD

Состав	Состав вяжущего		Самонапряжение, МПа				Расширение, %				Прочность при сжатии, МПа			
	ПЦ	РД	3 сут	14 сут	28 сут	50 сут	3 сут	14 сут	28 сут	50 сут	3 сут	14 сут	28 сут	50 сут
1	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	22,4	34,1	49,4	48,6
2	95	5	0,2	0,4	0,7	0,4	0,04	0,08	0,06	0,02	23,1	34,1	52,2	56,4
3	92	8	0,6	0,9	1,2	0,8	0,07	0,11	0,2	0,08	28,1	37,8	56,4	56,7
4	90	10	0,7	1,4	1,8	1,6	0,1	0,25	0,28	0,21	27,1	39,2	56,4	58,3
5	85	15	0,9	1,8	1,7	1,5	0,12	0,26	0,3	0,28	24,1	39,8	56,6	58,6

– расширить сырьевую базу для получения высокоэффективных строительных материалов;

– решить экологическую задачу по защите окружающей среды путем утилизации отходов металлургических производств.

Полученные результаты использования промышленных отходов доменных шлаков Нижнетагильского металлургического комбината показали, что в ряде заводов можно получать расширяющие добавки.

В регионах Сибири и Урала имеются заводы, в отходах которых содержание оксидов алюминия (Al_2O_3) более 15%, поэтому НИИЖБ им. А.А. Гвоздева обратился с предложением использовать их собственные отходы для выпуска расширяющих добавок и получения эффективных бетонов для возведения водонепроницаемых конструкций подземной части жилых и общественных зданий (в том числе по методу «белой ванны»).

Список литературы

1. Баженов Ю.М., Дворкин Л.И. Ресурсосбережение в строительстве за счет применения побочных промышленных продуктов. М.: ЦМИПКС, 1986. 66 с.
2. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющие и напругающие цементы и самонапряженные конструкции. М.: Стройиздат, 1974. 312 с.

3. Рояк С.М., Рояк Г.С. Специальные цементы. М.: Стройиздат, 1983. 279 с.
4. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.: Стройиздат, 1968. 268 с.
5. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1989. 348 с.

References

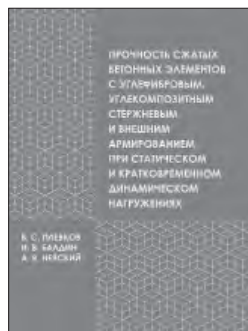
1. Bazhenov YU.M., Dvorkin L.I. Resursosberezhenie v stroitel'stve za schet primeneniya pobochnykh promyshlennykh produktov [Resource saving in construction through the use of by-products of industrial production]. Moscow: CMIPKS, 1986. 66 p.
2. Mikhailov V.V., Litver S.L. Rasshirayushchie i napryagayushchie tsementy i samonapryazhennye konstruksii. [Expanding and straining cements and self-stressed structures]. Moscow: Stroyizdat. 1974. 312 p.
3. Royak S.M., Royak G.S. Spetsial'nye tsementy [Special cements]. Moscow: Stroyizdat. 1983. 279 p.
4. Batrakov V.G. Modifitsirovannye betony. Teoriya i praktika [Modified concrete. Theory and practice]. Moscow: Stroyizdat. 1968. 268 p.
5. Kuznetsova T.V., Kudryashov I.V., Timashev V.V. Fizicheskaya khimiya vyazhushchikh materialov [Physical chemistry of binding materials]. Moscow: Vysshaya shkola. 1989. 348 p.

Прочность сжатых бетонных элементов с углефибровым, углекомпозитным стержневым и внешним армированием при статическом и кратковременном динамическом нагружениях

Авторы – В.С. Плевков, И.В. Балдин, А.В. Невский

ISBN 978-5-6048004-3-0

Томск, Издательство ТГАСУ. 2022, 176 с.



Монография посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям сжатых бетонных конструкций с углекомпозитным стержневым армированием при статическом и кратковременном динамическом нагружениях. Приведены результаты испытаний и диаграмма состояния углекомпозитной арматуры при растяжении и сжатии. Рассмотрены наиболее рациональные способы реализации ее высокого прочностного потенциала в статически и динамически нагруженных сжатых бетонных элементах при помощи углеродного фибрового и углекомпозитного внешнего армирования бетона. На основе опытных данных и результатов теоретических исследований сформулирован инженерный метод расчета прочности сжатых бетонных элементов с углеродным фибровым, углекомпозитным стержневым и внешним армированием. Приведены результаты численных и экспериментальных исследований

сжатых бетонных элементов с различными параметрами углефибрового, стержневого и внешнего углекомпозитного армирования при статическом и кратковременном динамическом нагружениях.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций.