

М.Ю. ТИТОВ, канд. техн. наук, И.С. КУЗНЕЦОВА, канд. техн. наук,
М.И. БЕЙЛИНА, инженер-технолог, В.А. ШАБАЛИН, инженер-технолог (niizhb-7@yandex.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона –
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, к. 5)

Применение отходов металлургической промышленности для получения жаростойких бетонов

Потребность строительной индустрии в разработке и применении строительных материалов с высокими физико-механическими показателями может быть удовлетворена за счет использования дешевых отходов металлургической промышленности – доменных молотых и гранулированных шлаков. Возможность применения доменных шлаков в качестве заполнителей для получения жаростойких бетонов основана на том, что при нагреве до температуры 800°С шлаки имеют более высокую прочность, чем портландцемент и традиционные заполнители. В то же время шлаковые заполнители в 1,2–2 раза дешевле природных и требуют значительно меньших финансовых затрат. Применение шлаковых заполнителей для получения жаростойких бетонов позволит изготавливать жаростойкие конструкции с высокими эксплуатационными характеристиками. Кроме того, использование отходов металлургического производства в виде доменных шлаков улучшает экологическую обстановку, является актуальным решением рециклинга.

Ключевые слова: доменные шлаки, жаростойкий бетон, заполнители, прочность, остаточная прочность, обжиг, сушка, температурная усадка.

Для цитирования: Титов М.Ю., Кузнецова И.С., Бейлина М.И., Шабалин В.А. Применение отходов металлургической промышленности для получения жаростойких бетонов // *Бетон и железобетон*. 2022. № 1 (609). С. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-31-35>

M.Yu. TITOV, Candidate of Sciences (Engineering), I.S. KUZNETSOVA, Candidate of Sciences (Engineering), M.I. BEILINA, Engineer, V.A. SHABALIN, Engineer
Research, Design and Technological institute of Concrete and Reinforced Concrete – NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC “Research Center “Stroitel'stvo”
(6, build. 5, 2-nd Institut'skaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

The use of Waste From the Metallurgical Industry for the Production of Heat-Resistant Concrete

The need of the construction industry in the development and application of building materials with high physical and mechanical characteristics can be met through the use of cheap waste from the metallurgical industry – blast furnace ground and granulated slags. The possibility of using blast furnace slag as aggregates for the production of heat-resistant concrete is based on the fact that when heated to a temperature of 800° C, the slags has a higher strength than Portland cement and traditional fillers. At the same time, slag aggregates are 1.2–2 times cheaper than natural ones and require significantly lower financial costs. The use of slag aggregates for the production of heat-resistant concretes will make it possible to produce heat-resistant structures with high operational characteristics. The use of metallurgical waste in the form of blast furnace slag improves the environmental situation.

Keywords: blast furnace slags, heat-resistant concrete, fillers, strength, residual strength, firing, drying, temperature shrinkage.

For citation: Titov M.Yu., Kuznetsova I.S., Beylina M.I., Shabalin V.A. The use of waste from the metallurgical industry for the production of heat-resistant concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No 1. (609), pp. 31–35. (In Russian).
DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-31-35>

Принципы государственной политики и приоритетные направления обращения с отходами производства содержатся в Федеральном законе от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления».

В соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 января 2018 г. №84-р разработана стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г.

Одними из основных отходов металлургической промышленности являются доменные шлаки, которые в отвалах занимают сотни гектаров земли, загрязняя почву и природу. Утилизация отходов металлургиче-

ской промышленности является актуальной экономической и экологической проблемой во всем мире.

Шлаки характеризуются относительно постоянным химическим составом и экологически безопасны.

В нашей стране в промышленности строительных материалов используется только около 20% доменных шлаков, в то время как в высокоразвитых странах до 90%.

В то же время использование доменных шлаков в производстве различных видов строительных материалов является актуальной задачей, так как это дает возможность получать материалы с целым рядом специфических свойств, значительно снижая материало- и энергоемкость производства.

Возможность использования доменных шлаков для жаростойкого бетона была инициирована и доказана российскими учеными: В.М. Москвиным, К.Д. Некрасовым, В.В. Жуковым, П.П. Будниковым и др., а также зарубежными учеными – А.Е. Баренбергом, Р.Р. Даудом, Т.В. Паркером [1–5].

Возможность использования доменных шлаков для получения жаростойких бетонов основана на том, что при нагреве до 800°C шлаки имеют более высокую прочность, чем портландцемент. Кроме того, шлаковый щебень в 1,5–2 раза дешевле природного и требует приблизительно в пять раз меньше финансовых затрат.

Жаростойкий бетон представляет собой специальный вид бетона, который под длительным действием высоких температур способен сохранять заданные физико-механические характеристики, регламентируемые по ГОСТ 20910–2019 «Бетоны жаростойкие. Технические условия».

Жаростойкие бетоны применяются для изготовления несущих строительных конструкций, работающих в условиях повышенных и высоких технологических (эксплуатационных) температур, а также в качестве жаростойких футеровок в тепловых агрегатах на предприятиях химической промышленности, черной и цветной металлургии, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, промышленности строительных материалов и др. (газоходы, боровы, паровые котлы, фундаменты тепловых агрегатов, печи, трубы, плиты коксовых батарей и пр.).

Применение жаростойких бетонов позволяет значительно сократить сроки строительства и ремонта тепловых агрегатов, снизить себестоимость и трудоемкость процессов [6, 7] (Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов. Методическое пособие. М., 2016).

В качестве заполнителя для жаростойкого бетона возможно применение гранулированного доменного шлака, являющегося отходом черной металлургии и получаемого при охлаждении чугуна во время его выплавки. Доменный шлак негранулированного типа добывают в процессе воздушного охлаждения отходов металлургии, их дробления и последующего грохочения.

Если говорить о свойствах шлака доменного, то он отличается высоким сопротивлением к измельчению, реакционной способностью и стабильностью.

Доменный шлак представляет собой многокомпонентную систему. Трудно установить строгое количественное изменение свойств шлака при одновременном изменении содержания в нем нескольких составляющих.

Основные составляющие доменного шлака – кварц, оксиды алюминия, кальция и магния, на кото-

рые может приходиться 85–90% всего состава шлака. Остальные 15–10% могут включать марганец, соединения железа и серы и примеси других элементов. Однако следует отметить, что основные оксиды, входящие в состав шлака, не встречаются в свободной форме. В доменном шлаке, охлажденном воздухом, оксиды объединяются в различные силикаты и алюмосиликатные минералы, такие как мелилит, мервинит, волластонит и др., которые также существуют в виде природных пород. В дробленном и молотом шлаке данные элементы присутствуют в виде стекла.

Имея подобную химико-минералогическую природу с портландцементом, доменные шлаки, реагируя с гидроксидом кальция, обеспечивают хорошее сцепление цементного камня с заполнителем, высокую прочность и повышенную долговечность бетона.

Химический состав шлаков варьируется в некоторых пределах, поскольку варьируется сырье, загружаемое в доменную печь [8, 9]. Поэтому применение доменного гранулированного и дробленого доменных шлаков в качестве заполнителей для жаростойких бетонов заданного качества требует проведения специальных исследований по подбору составов бетонов и испытаний характерных свойств.

В настоящей работе приведены результаты исследований жаростойкого бетона класса по прочности при сжатии В25 и класса по предельно допустимой температуре применения ИЗ, изготовленного с применением молотого доменного гранулированного и дробленого шлаков ПАО «Северсталь».

При нагревании железобетонных конструкций деструктивные процессы протекают не только в цементном камне, но и в заполнителях. Обычные силикатные и карбонатные заполнители используются для изготовления тяжелых бетонов, работающих в условиях воздействия температуры не выше 200°C. Заполнители для жаростойких бетонов с температурой применения свыше 200°C не должны разрушаться при длительном действии высоких температур и не должны быть источником внутренних напряжений в структуре конструкций.

Для разработки составов жаростойких бетонов ВР Р В25 F300 W6 ИЗ ГОСТ 20910–2019 «Бетоны жаростойкие. Технические условия» были использованы следующие сырьевые материалы:

- вяжущее – портландцемент ПЦ 500Д0 Н;
- мелкий заполнитель – шамотный порошок фракции 1–3 мм;
- крупный заполнитель – щебень фракционированный из дробленого доменного шлака для дорожного строительства фракции 10–20 мм производства ПАО «Северсталь» с характеристиками: насыпная плотность – 1160 кг/м³; прочность – 1000 кг/м³; морозостойкость – F200; содержание CaO – 35,5%;

содержание SiO_2 – 33,3%; содержание Al_2O_3 – 7,9%; содержание MgO – 10%; содержание посторонних примесей – 1,4%; суперпластификатор – эффективная суперпластифицирующая добавка Sika Visco Grete 5600SP (ТУ 2493-00913613997–2011). Основа добавки – водные композиции модифицированных поликарбоксилатных эфиров.

Изготовление экспериментальных составов жаростойких бетонов и серий опытных образцов-кубов размерами 100×100×100 мм производилось в лаборатории № 7 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева в соответствии с положениями ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». После изготовления образцы помещались в камеру нормального твердения, где хранились в течение 7 сут.

Определение прочности при сжатии опытных образцов-кубов производилось в проектном и промежуточном возрасте после режимов твердения и сушки в соответствии с положениями ГОСТ 10180–2012 и ГОСТ 18105–2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности». Класс по прочности при сжатии бетонов оценивался по схеме Г ГОСТ 18105–2010 в возрасте 28 сут.

Определение остаточной прочности при сжатии разработанного состава жаростойкого бетона класса И3 производилось по методике приложения А ГОСТ 20910–2019 после нагрева до предельно допустимой температуры применения 300°C после режимов твердения и сушки при (105±5)°C, согласно таблице А.1 ГОСТ 20910–2019.

После режимов твердения при температуре 20°C в течение 7 сут и сушки при температуре (105±5)°C в течение 48 ч образцы помещали в электрическую печь ЭКПС-300 с автоматическим режимом подъема и регулирования температуры. Нагрев образцов-кубов жаростойкого бетона до температуры 300°C производился со скоростью подъема температуры 150°C/ч с последующей изотермической выдержкой в течение 4 ч и охлаждением до 20°C в пространстве печи (рис. 1). Далее образцы помещались на стеллаж над водой, где хранились в течение 7 сут (рис. 2).

Прочность бетона BR P B25 И3 в промежуточном



Рис. 1. Нагрев образцов в муфельной печи
Fig. 1. Heating of samples in a muffle furnace

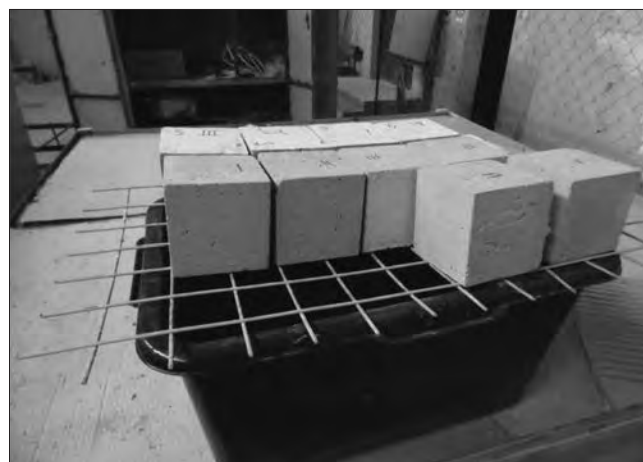


Рис. 2. Выдержка образцов над водой в течение 7 суток после нагрева
Fig. 2. Exposure of samples above water for 7 days after heating

и проектном возрасте представлена в табл. 1.

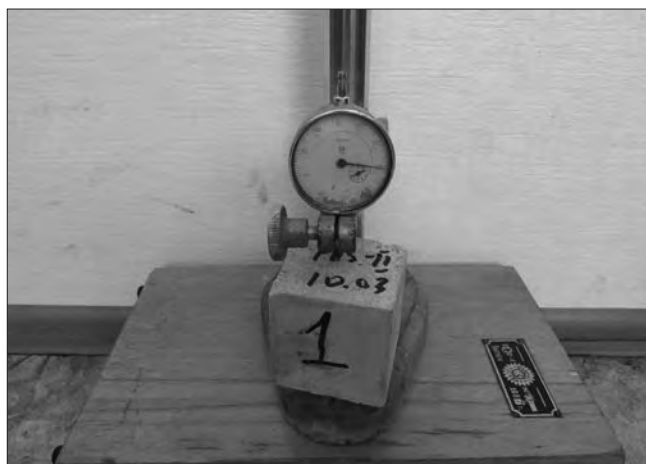
Остаточная прочность определяется в процентах как отношение прочности бетона при сжатии после нагрева до предельно допустимой температуры к прочности бетона в проектном возрасте.

По результатам лабораторных испытаний установлено, что остаточная прочность при сжатии образцов из разработанного состава жаростойкого бетона после нагрева до 300°C составила 43,18 МПа, что ниже прочности в проектном возрасте на 6% и соответствует требованиям ГОСТ 20910–2019 (снижение прочно-

Таблица 1
Table 1

Прочность при сжатии жаростойкого бетона BR P B25 И3 в промежуточном и проектном возрасте
Compressive strength of heat-resistant concrete BR PB 25 I3 in intermediate and design age

Возраст бетона	После твердения в нормальных условиях (без сушки)		После твердения в нормальных условиях и сушки при температуре (105±5)°C	
	Прочность при сжатии, МПа	Класс бетона	Прочность при сжатии, МПа	Класс бетона
2 сут (промежуточный)	13,67	–	–	–
17 сут (промежуточный)	23,99	–	–	–
28 сут (проектный)	39	B30	45,8	B35



сти после нагрева не более 20%). Внешних дефектов

Рис. 3. Испытания образцов на усадку

Fig. 3. Shrinkage testing of samples

в образцах-кубах после обжига до 300°C не выявлено.

Проведены исследования предельного значения температурной усадки исследуемых составов жаростойких бетонов по методике приложения Г ГОСТ 20910–2019 (рис. 3).

Усадка (ξ , %) определяется по формуле:

$$\xi = \frac{l - l_1}{l} \times 100\%,$$

где l – среднее значение размера образца после твердения, мм; l_1 – среднее значение размера образца после нагревания, мм.

Результаты исследований температурной усадки представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, коэффициент температурной усадки после нагрева до 300°C составил 0,57%, что соответствует требованию п. 4.4.15 ГОСТ 20910–2019.

Определение марки по водонепроницаемости (W) разработанного состава жаростойкого бетона BR P B25 И3 (табл. 1) проводили на шести образцах в виде цилиндрических пластин диаметром 150 мм и толщиной 50 мм в соответствии с методикой ГОСТ 12730.5–2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости».

Разработанный состав жаростойкого бетона BR P B25 И3 характеризуется маркой по водонепроницаемости W10.

Определение марки по морозостойкости (F) разработанного состава жаростойкого бетона BR P B25 И3 проводили на образцах-кубах размерами 10×10×10 см по методике ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» (третий ускоренный метод в 5%-м водном растворе хлорида натрия). Морозо-

Таблица 2
Table 2

Результаты определения усадки образцов-кубов, изготовленных из жаростойкого бетона BR P B25 И3
Results of determination of shrinkage of cube samples made of heat-resistant concrete BR PB 25 И3

Размеры, см (схема 1)	Маркировка образца					
	ИЗ-1		ИЗ-2		ИЗ-3	
	До сушки l	После нагрева l_1	До сушки l	После нагрева l_1	До сушки l	После нагрева l_1
Дата	10.08.2021		10.08.2021		10.08.2021	
a	10	10	10	10,98	10,05	7,02
b	10,11	10,05	10,10	10,07	10,1	7,05
h	10,1	10,04	10,15	10,1	10,2	7,16
Сумма измерений	30,21	31,09	31,25	31,15	31,35	21,23
Усадка (ξ), %	0,6		0,5		0,6	
Средняя усадка	0,57%					

Таблица 3
Table 3

Результаты определения марки по водонепроницаемости разработанного состава жаростойкого бетона BR P B25 И3
The results of the determination of the waterproof grade of the developed composition of heat-resistant concrete BR PB I 3

№ образца	Диапазон $T_{i,c}$	Марка бетона по водонепроницаемости W_i	Среднее значение марки по водонепроницаемости бетона W
1	2	3	4
1	182	8	W10
2	190	10	
3	240	10	
4	244	10	
5	263	12	
6	265	12	

стойкость состава жаростойкого бетона BR P B25 И3 составила $F_1 100$.

Выводы

В результате проведенных исследований получен жаростойкий бетон BR P B30 И3 по ГОСТ 20910 со следующими характеристиками:

- прочность при сжатии – класс В35;
- класс бетона по предельно допустимой температуре применения – И3;
- остаточная прочность после нагрева до 300°C – 0,6%;
- коэффициент температурной усадки бетона – 0,57%;
- морозостойкость – $F_1 100$;
- водонепроницаемость – W10.

Проведенные исследования показали, что молотый дробленый шлак может быть использован для получения жаростойких бетонов с заданными эксплуатационными характеристиками. Доменные шлаки, вводимые в состав жаростойкого бетона в качестве заполнителей, позволяют обеспечить требуемые прочностные характеристики бетонов и заданные свойства, а также использовать состав в качестве конструкционного жаростойкого бетона. Такие бетоны могут быть использованы для типовых изделий различного назначения, например для элементов промышленных и бытовых отопительных и нагревательных систем, футеровок камер сгорания.

Список литературы

1. Баженов Ю.М., Дворкин Л.И. Ресурсосбережение в строительстве за счет применения побочных промышленных продуктов. М.: ЦМИПКС, 1986. 66 с.
2. Волженский А.В., Буров Ю.С., Виноградов Б.Н., Гладких К.В. Бетоны и изделия из шлаковых и зольных материалов. М.: Издательство литературы по строительству, 1969. 392 с.
3. Будников П.П., Значко-Яворский И.Л. Гранулированные доменные шлаки и шлаковые цементы. М.: Промстройиздат, 1953. 224 с.
4. Волженский А.В. Комплексная переработка и использование металлургических шлаков в строительстве // *Строительные материалы*. 1986. № 5. С. 28–30.
5. Применение молотого доменного гранулированного шлака в строительстве США // *ВНИИНТПИ. Сер. Строительные конструкции и материалы*. 2002. № 1. С. 28–32.
6. Смирнов Д.С., Рахимов Р.З., Стоянов О.В. Влияние добавок молотых шлаков на жаростойкость цементного камня // *Вестник Казанского техноло-*

гического университета. 2014. Т. 17. № 6. С. 48–50.

7. Малькова М.Ю. Жаростойкие бетоны на шлаковом вяжущем // *Конструкции из композиционных материалов*. 2006. № 2. С.23–25.
8. Миронов В.А., Белов В.В., Голубев А.И., Смирнов М.А. Оптимизирование композиций для изготовления строительных смесей. СПб.: РИА «Квинтет», 2008. 416 с.
9. Баженов Ю.М. Технология бетонов XXI века. Новые научные направления строительного материаловедения: материалы докладов Академических чтений РААСН. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. С. 9–19.

References

1. Bazhenov YU.M., Dvorkin L.I. Resursosberezhenie v stroitel'stve za schet primeneniya pobochnyh promyshlennyh produktov [Resource saving in construction through the use of by products of industrial production]. Moscow: CMIPKS. 1986. 66 p.
2. Volzhenskij A.B., Burov YU.S., Vinogradov B.N., K.V. Gladkih Betony i izdeliya iz shlakovyh i zol'nyh materialov [Concrete and products from slag and ash materials]. Moscow: Izdatelstvo literatury po stroitel'stvu. 1969. 392 p.
3. Budnikov P.P., Znachko-YAvorskij I.L. Granulirovanye domennye shlaki i shlakovy cement [Granulated blast furnace slags and slag cements]. Moscow: Promstrojizdat, 1953. 224 p.
4. Volzhenskij A.B. Complex processing and use of metallurgical slags in construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 1986. No. 5, pp. 28–30. (In Russian).
5. The use of ground blast-furnace granulated slag in US construction. *VNIINTPI. Ser. Stroitel'nye onstrukcii i materialy*. 2002. No. 1, pp. 28–32. (In Russian).
6. Smirnov D.S., Rakhimov R.Z., Stoyanov O.V. Influence of additives of ground slags on the heat resistance of cement stone. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. Vol. 17. No. 6, pp. 48–50. (In Russian).
7. Malkova M.Yu. Heat-resistant concretes based on slag binder. *Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov*. 2006. No. 2, pp. 23–25. (In Russian).
8. Mironov V.A., Belov V.V., Golubev A.I., Smirnov M.A. Optimizirovanie kompozicij dlya izgotovleniya stroitel'nyh smesey: Nauchnoe izdanie [Optimization of compositions for the manufacture of building mixtures: Scientific publication.] Saint Petersburg: RIA «Quintet». 2008. 416 p.
9. Bazhenov Yu.M. Technology of concrete of the XXI century. Belgorod: Publishing house BSTU. V.G. Shukhov. 2005, pp. 9–19. (In Russian).