

EDN: **KLSONF**

УДК 666.9.017

А. И. ДОЛБУСИН, Е. В. ЕГОРОВА, Т. П. КИЦЕНКО, Е. Т. БОРОДАЙ, В. В. ОЧЕРЕТЬКОФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. о. Макеевка, г. Макеевка

ПРИМЕНЕНИЕ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ДОНБАССА В СОСТАВЕ ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ

Аннотация. Приведены результаты исследований механических свойств тяжелого бетона с частичной или полной заменой крупного и мелкого заполнителей отходами промышленности Донбасса. В качестве отхода промышленности для замены заполнителей применена золошлаковая смесь (ЗШС) Зуевской ТЭС. Установлено, что свойства полученных бетонов удовлетворяют требованиям нормативных документов, а, следовательно, позволяют использовать золошлаковую смесь в качестве заполнителя в тяжелых бетонах. Исследования показали, что при замене заполнителей в тяжелых бетонах золошлаковой смесью и применении необходимых добавок, прочностные характеристики бетонов изменяются незначительно. Таким образом, можно рекомендовать применять разработанные составы бетонов, содержащие раствор полифункционального действия "ПФМ-НЛК", при производстве изделий и конструкций, применяемых в транспортном строительстве, а также для возведения промышленных и гражданских зданий и сооружений повышенной долговечности. Отдельные составы бетона с использованием золошлаковой смеси применимы для возведения конструкций, работающих в условиях воздействия высоких температур. Также, с применением ЗШС в бетонах, решается проблема утилизации промышленных отходов – золошлакоотвалов.

Ключевые слова: тяжелый бетон, прочность, золошлаковая смесь, заполнитель

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одной из основных современных проблем строительной отрасли является создание новых и модификация уже существующих строительных материалов с улучшенными свойствами с целью снижения сроков и стоимости выполненных строительных работ.

Исторически для Донбасса, как промышленного развитого региона, характерным является научный поиск решения проблемы получения строительных материалов с использованием различных отходов промышленных производств. При этом необходимо стремиться к разработке таких строительных материалов на основе отходов производства, которые не только бы удовлетворяли требованиям соответствующих нормативных документов, но и характеризовались повышенными физико-механическими свойствами.

С увеличением эффективности строительства растет и потребность города в энергетических и материальных ресурсах. Постепенно растут мощности теплоэлектростанций, повышающие в несколько раз объемы использования топлива, а это, в свою очередь, приводит к многократному возрастанию объемов техногенных отходов и, в частности, золошлаковых смесей. Они занимают огромные территории, что приводит к уменьшению площадей, которые возможно использовать в сельском хозяйстве, а также резко ухудшают экологическую ситуацию предприятия и места захоронения отходов, прилегающих к этим районам. Происходит загрязнение окружающей среды: бассейнов рек, почвы, воздуха многих населенных пунктов [1]. В связи с этим на сегодняшний день остро стоит проблема утилизации накопленных промышленных отходов.

Таким образом, научные разработки, связанные с применением промышленных отходов при производстве строительных материалов позволяют комплексно решить проблемы охраны окружающей среды при утилизации отходов различных отраслей промышленности (металлургия, топливно-энергетический комплекс и т. д.).

© А. И. Долбусин, Е. В. Егорова, Т. П. Киценко, Е. Т. Бородай, В. В. Очеретько, 2024



Примером такого комплексного подхода является применение в качестве активных минеральных добавок в составе вяжущих, растворных и бетонных смесей в строительстве золошлаковых смесей, которые представляют собой отход, образующийся при сжигании энергетического угля на теплоэлектростанциях.

Имеется большой опыт применения золошлаковых смесей Зуевской ТЭС в строительстве на Донбассе, однако существует ещё много неисследованных вопросов их использования в составе современных бетонных смесей.

Существуют эффективные решения для уменьшения количества и непосредственной утилизации золошлаковых отходов ТЭС Донбасса. Во-первых, важно улучшение системы сбора, транспортировки и хранения отходов. Необходимо разработать и внедрить современные технологии, которые позволят сократить объем техногенных отходов и предотвратить их негативное воздействие на окружающую среду.

Во-вторых, следует активно развивать и применять технологии переработки золошлаковых отходов для получения ценных и полезных продуктов – например при производстве строительных материалов и изделий. Такой подход позволит утилизировать отходы и одновременно минимизировать потребность в использовании природных ресурсов и не зависеть от их доступности.

Такие минеральные добавки, как золошлаковые смеси, относятся к химически активным по механизму взаимодействия с цементной матрицей бетона. В нормальных условиях они реагируют с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, содержащимся в капиллярно-пористой среде твердеющего вяжущего. В результате образуются гидросиликаты кальция, что сопровождается срастанием заполнителей с цементной матрицей и полной ликвидацией зазоров между ними. Известно, что образующиеся гидросиликаты и гидроалюминаты кальция усиливают сцепление в контактной зоне бетона. Также в условиях химической агрессии способствуют кольматации контактной зоны между заполнителем и цементной матрицей бетона, тем самым повышая его долговечность и стойкость конструкций [2].

В работе [3] приведены исследования характеристик вяжущих материалов, содержащих в своем составе золу-унос и золошлаковую смесь Зуевской ТЭС. Полученные результаты показали целесообразность применения этих техногенных продуктов при производстве портландцемента. Эффективные практические решения по использованию золошлаковых отходов при производстве строительных материалов приведены также в работах [4–6].

В целом, решение проблем золошлаковых отходов ТЭС нашего региона требует комплексного подхода, который включает в себя совершенствование технологий утилизации, разработку новых методов переработки отходов, а также усиление контроля и государственного регулирования этих мероприятий. Использование этих мер позволит снизить негативное воздействие золошлаковых отходов на окружающую среду, улучшить экологическую ситуацию в регионе и способствовать устойчивому развитию.

Целью исследования является разработка составов бетонов с полной или частичной заменой крупного и мелкого заполнителей золошлаковой смесью Зуевской ТЭС.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Согласно ГОСТ 25592-2019 [7] золошлаковая смесь, как вторичный минеральный ресурс для использования в различных видах бетонов, строительных растворах по способу применения подразделяются на три вида в качестве крупного и мелкого заполнителя и минеральных добавок с переменными строительно-техническими свойствами и однородностью по гранулометрическому, химическому и фазово-минералогическому составу:

- без предварительной подготовки;
- с предварительной переработкой;
- в качестве минеральной добавки в виде сухой золы (восстановленная отвальная зола) со стабильными строительно-техническими свойствами и обеспеченной однородностью по гранулометрическому и фазово-минералогическому составу в результате применяемой технологии переработки.

Известно, что золошлаковые смеси, удаляемые в золоотвал, состоят из зольной составляющей (частицы золы и шлака размером менее 0,315 мм) и шлаковой, включающей зерна шлака размером от 0,315 до 5(3) мм – как мелкого заполнителя и зерна шлака, размером свыше 5(3) мм – как крупного заполнителя. Что позволяет использовать ЗШС взамен крупного и мелкого заполнителей в составе бетонов.

Для проведения исследований в качестве вяжущего вещества для приготовления бетонных смесей применяли портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 52,5 Н Амвросиевского цементного завода ООО «ПИК-Цемент» (активность $R_n = 52,5$ МПа).

В качестве заполнителей использовали:

– песок кварцевый (П) Прохоровского карьера с $M_k = 1,64$ (содержание ПИГ = 3 %, насыпная плотность $\rho_0 = 1\,267$ кг/м³);

– щебень гранитный (Щ) Стыльского месторождения (фракции 5...20 мм; марка по дробимости Др1200);

– золошлаковая смесь Зуевской ТЭС (фракции 0,16...20 мм, насыпная плотность $\rho_n = 1\,173$ кг/м³).

В качестве химических добавок использовались: комплексная добавка суперпластификатор СП-3; полифункциональный модификатор бетона – ПФМ-НЛК.

Отметим, что добавка ПФМ-НЛК предназначена для получения тяжёлых бетонов высокой морозостойкости из подвижных или литых смесей. Такие бетоны имеют широкую область применения как при производстве ненапрягаемых, так и предварительно напряженных сборных и монолитных бетонных и железобетонных изделий и конструкций промышленных и гражданских зданий и сооружений, а также сооружений специального назначения (в гидротехнических и мостовых конструкциях и сооружениях, эксплуатирующихся в агрессивных условиях внешней среды).

Физико-механические испытания бетонов проводились по стандартным методикам.

Состав качественной золошлаковой смеси должен быть следующим: зола (остаток на сите 0,315) – 30 % фракции и шлак – 70 % фракции. В случае, если идет превышение фракции золы, то в состав вводят щебень, а если превышение фракции шлака, то вводят песок, чтобы сохранялась пропорция 30/70.

Химико-минералогический состав золошлаковой смеси представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химико-минералогический состав золошлаковой смеси Зуевской ТЭС

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	BaO	MnO	ZrO ₂	SrO	Cr ₂ O ₃	NiO	Co ₃ O ₄	ZnO	CuO
57,19	25,05	8,94	3,09	1,79	1,45	1,05	0,67	0,27	0,18	0,08	0,07	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01

Формование образцов выполнено в стандартных металлических разборных формах с размером ребра 0,1 м. Уплотнение образцов выполнено на стандартной лабораторной виброплощадке. Составы бетонов приведены в таблице 2. Для исследований были приняты и рассчитаны 5 составов бетонов (1 – контрольный, 2 – с частичной заменой заполнителей, 3 – с полной заменой заполнителей ЗШС и 4,5 – жаростойкие бетоны на золошлаковой смеси).

Таблица 2 – Составы бетонов с использованием золошлаковой смеси

№ состава	Наименование состава	Компоненты бетонных смесей, кг (на 1 м ³)						
		ПЦ	ЗШС	Щ	П	В	СП-3	ПФМ-НЛК
1	B25 W6 F200	460	–	1 200	585	165	–	0,5 % m _B
2	B25 W8 F200	500	1 000	700	–	165	–	0,5 % m _B
3	B25 W8 F200	500	1 700	–	–	165	–	0,5 % m _B
4	B25 И8 W6 F100	530	1 545	–	–	170	0,7 % m _B	–
5	B22,5 И8 W6 F100	400	1 600	–	–	220	0,7 % m _B	–

Образцы твердели в камере с нормальными условиями твердения: температурой (20±2) °С и относительной влажностью воздуха (95±5) %.

Для составов 1–3 прочность бетона на сжатие на 7 и 28 сутки определялась по стандартной методике [8]. Прочность бетона 4 и 5 составов и прочность бетона в промежуточном возрасте определили после принятых режимов твердения в соответствии с ГОСТ 20910-2019 [9].

Для установления остаточной прочности определяли прочность на сжатие бетонных образцов после их нагрева до температуры 800 °С. Перед нагревом выше 110 °С образцы высушивались в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 105...110 °С. Нагрев образцов производился со скоростью 200±20 °С/час и выдержкой при контрольной температуре в течение 4 часов, охлаждение происходило вместе с отключенной электропечью.

После остывания образцы бетона были помещены на сетчатый стеллаж, расположенный в ванне над водой. Образцы выдерживались в ванне в течении 7 сут, затем после предварительного осмотра была определена прочность на сжатие по методике [8].

Остаточную прочность жаростойкого бетона на сжатие γ , %, вычисляли по формуле:

$$\gamma = \frac{R_t}{R} \cdot 100 \%,$$

где R_t – прочность бетона на сжатие после нагрева, МПа;
 R – прочность бетона на сжатие в проектном возрасте, МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ВЫВОДЫ

Механические характеристики тяжелых бетонов на 7 и 28 сутки представлены в таблице 3. Остаточные прочности бетонов 4 и 5 составов представлены в таблице 4.

Таблица 3 – Механические характеристики тяжелых бетонов

№ состава	№ состава	Показатели предела прочности на сжатие, МПа / %, в возрасте			
		7 сут	не менее 70 %	28 сут	не менее 100 %
1	B25 W6 F200	24,1	75 %	34,0	106 %
2	B25 W8 F200	23,4	73 %	33,1	103 %
3	B25 W8 F200	23,7	74 %	33,6	105 %
4	B25 И8 W6 F100	23,1	72 %	32,8	102 %
5	B22,5 И8 W6 F100	20,8	72 %	29,5	102 %

Таблица 4 – Остаточные прочности жаростойких бетонов

№ состава	№ состава	Остаточная прочность на сжатие, МПа / %, после ТВО		Показатели предела прочности на сжатие, МПа / %, в возрасте	
			не менее 30 %	28 сут	не менее 100 %
4	B25 И8 W6 F100	10,4	32 %	32,8	102 %
5	B22,5 И8 W6 F100	9,1	31 %	29,5	102 %

Анализ результатов эксперимента показал, что разработанные составы 2 и 3 бетона с применением золошлаковой смеси имеют прочностные характеристики, соответствующие заявленному классу бетона на сжатие. Также установлено, что образцы, в которых содержится золошлаковая смесь Зуевской ТЭС взамен заполнителей, показывают результаты прочности на сжатие, соответствующих контрольному составу, однако имеют преимущество в экономическом плане, исходя из себестоимости бетонной смеси, несмотря на перерасход портландцемента.

Во 2 и 3 составах использовалась добавка «ПФМ-НЛК», что, согласно полученным механическим характеристикам и техническим условиям по использованию добавки, позволяет рекомендовать применение этих бетонов в: гидротехнических сооружениях с целью повышения водонепроницаемости бетона и для устройства конструкционной гидроизоляции (первичной защиты бетона); транспортных сооружениях и дорожных бетонах с целью повышения морозостойкости бетона; области строительства промышленных и гражданских сооружений с целью повышения долговечности конструкций.

Также установлено, что показатели по остаточной прочности на сжатие жаростойких составов 4 и 5 отвечают требованиям ГОСТ 20910-2019 [9].

По полученным данным можно сделать вывод о том, что применение в составах тяжелых бетонов золошлаковой смеси ТЭС при частичной или полной замене заполнителей, позволяет получить бетоны, свойства которых не уступают традиционным бетонам. Разработанные бетоны могут охарактеризоваться как качественный и долговечный материал, с чем будут связаны дальнейшие исследования. Так планируется исследовать и оценить сульфатостойкость, морозостойкость и водонепроницаемость разработанных составов бетонов.

В заключение можно отметить: исходя из того, что пески, добываемые в карьерах Донецкой Народной Республики мелкие или очень мелкие, а также содержат в своем составе повышенное количество

ПИГ частиц и имеют относительно высокую стоимость, вариант их замены золошлаковой смесью положительно скажется как на стоимости, так и на качестве и долговечности бетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Партута, Д. С. Рациональное использование золошлаковых отходов в строительных материалах / Д. С. Партута, В. А. Тютюнов. – Текст : электронный // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации : материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Омск, 01–03 октября 2013 года ; том 2. – 2013. – С. 79–82. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=tdgyux> (дата обращения: 13.11.2023). – EDN: TDGYXX.
2. Тольпина, Н. М. К вопросу о взаимодействии цементной матрицы с заполнителями / Н. М. Тольпина. – Текст : электронный // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 6 (часть 1). – С. 81–85. – URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=35983> (дата обращения: 13.11.2023).
3. Применение зол и золошлаковых отходов в качестве минеральной добавки для цементного вяжущего / Д. Д. Бучинков, А. Н. Литвиненко, С. В. Лахтарина [и др.]. – Текст : электронный // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2021. – Том 17, № 4. – С. 235–244. – URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2021-4/04_buchinkov_litvinenko_lahtarina_egorova_bobylev.pdf (дата публикации: 20.12.2021).
4. Коррозионная стойкость самоуплотняющегося бетона с комплексной добавкой / Е. В. Егорова, И. Ю. Петрик, Т. П. Киценко [и др.]. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2023. – Выпуск 2023-1(159) Современные строительные материалы. – С. 21–26. – URL: [http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2023/vestnik_2023-1\(159\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2023/vestnik_2023-1(159).pdf) (дата публикации: 20.02.2023).
5. Malhotra, V. M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc. / V. M. Malhotra, P. K. Mehta. – Ottawa, Canada : [s. n.], 2005. – 124 p. – Текст : непосредственный.
6. Использование золошлаковых отходов в качестве дополнительного цементирующего материала / Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Б. И. Булгаков [и др.]. – Текст : электронный // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 8. – С. 19–27. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-zoloshlakovyh-othodov-v-kachestve-dopolnitelnogo-tsementiruyuschego-materiala/viewer> (дата обращения: 20.11.2023).
7. ГОСТ 25592-2019. Смеси золошлаковые тепловых электростанций. Технические условия : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 апреля 2019 г. N 118-П) : взамен ГОСТ 25592-91 : дата введения 2020-06-01 / разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 144 «Строительные материалы и изделия». – Москва : Стандартинформ, 2019. – 20 с. – Текст : непосредственный.
8. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам : принят Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (протокол от 27 декабря 2012 г. № 2071-ст) : взамен ГОСТ 10180-90 : дата введения 2013-07-01 / разработан Научно-исследовательским, проектно-конструкторским и технологическим институтом бетона и железобетона «НИИЖБ» – филиалом ФГУП «НИЦ «Строительство». – Москва : Стандартинформ, 2013. – 30 с. – Текст : непосредственный.
9. ГОСТ 20910-2019. Бетоны жаростойкие. Технические условия : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 28 февраля 2019 г. № 116-П) : взамен ГОСТ 20910-90 : дата введения 2019-09-01 / разработан Структурным подразделением АО «НИЦ "Строительство" – Научно-исследовательским, проектно-конструкторским и технологическим институтом бетона и железобетона им. А. А. Гвоздева (НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ "Строительство"»). – Москва : Стандартинформ, 2019. – 20 с. – Текст : непосредственный.

Получена 25.12.2023

Принята 26.01.2024

ALEXEY DOLBUSIN, ELENA YEGOROVA, TATYANA KITSSENKO,
EKATERINA BORODAI, VLADISLAV OCHERETKO
THE USE OF ASH AND SLAG WASTE FROM DONBASS IN THE COMPOSITION
OF HEAVY CONCRETE
FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture», Russian
Federation, Donetsk People's Republic, Makeevka

Abstract. The results of studies of the mechanical properties of heavy concrete with partial or complete replacement of large and small aggregates with industrial waste from Donbass are presented. As a waste product of the industry, an ash-slag mixture (ZSHS) of the Zuyevskaya TPP was used to replace aggregates. It has been established that the properties of the obtained concretes meet the requirements of regulatory documents, and therefore allow the use of ash-slag mixture as a filler in heavy concretes. Studies have shown that when replacing aggregates in heavy concretes with an ash-slag mixture and using the necessary additives, the strength characteristics of concretes change slightly. Thus, it can be recommended to use the developed concrete compositions containing a solution of multifunctional action «PFM-NLK» in the

manufacture of products and structures used in transport construction, as well as for the construction of industrial and civil buildings and structures of increased durability. Individual concrete compositions using ash and slag mixtures are applicable for the construction of structures operating under high temperature conditions. Also, with the use of ZSHS in concrete, the problem of recycling industrial waste – ash and slag dumps is being solved.

Keywords: heavy concrete, strength, ash-slag mixture, filler.

Долбусин Алексей Игоревич – магистрант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: тяжелые бетоны с использованием золошлаковых отходов ТЭС.

Егорова Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: самоуплотняющиеся бетоны с полифункциональными модификаторами на основе отходов промышленности Донбасса.

Киценко Татьяна Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: цементные бетоны с заполнителями из отходов промышленности, огнеупорные вяжущие и бетоны.

Бородай Екатерина Таеровна – старший преподаватель кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: огнеупорные вяжущие и бетоны.

Очеретько Владислав Витальевич – магистрант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: тяжелые и самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов промышленности Донбасса.

Dolbusin Alexey – master's student; Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: heavy concrete with the use of ash and slag waste from thermal power plants.

Yegorova Elena – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: self-sealing concretes with multifunctional modifiers based on waste from the Donbass industry.

Kitsenko Tatyana – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: cement concretes with fillers from industrial waste, refractory binders and concretes.

Borodai Ekaterina – senior lecturer, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Do FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: heat-resistant binders and concretes

Ocheretko Vladislav – master's student; Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: heavy and self-sealing concretes using industrial waste from Donbass.