



*А.В. Копыльцов, И.В. Павлушков, О.А. Поварова*  
*Череповецкий государственный университет*

## **ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ ФОРМОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕМЫЧЕК ИЗ ПОЛИФРАКЦИОННОГО МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ШЛАКОБЕТОНА**

В статье приведены результаты исследований по возможности использования шлакосодержащих вяжущих в производстве конструкционного бетона. Разработанный состав мелкозернистого шлакобетона был применен в производстве сборных железобетонных перемычек. Особенность состава состоит в том, что в качестве заполнителя в нем используется шлаковый песок. Часть цемента замещается тонкомолотой полифракционной шлаковой добавкой. Производство добавки осуществляется совместным помолом шлакового песка и отсевом шлакового щебня. Произведенные конструкции, отвечают необходимым требованиям по прочности и теплопроводности. Промышленная апробация формования железобетонных перемычек из полифракционного мелкозернистого шлакобетона показала возможность внедрения разработанного состава в массовое производство.

Мелкозернистый шлакобетон, железобетонные перемычки, отсев шлакового щебня, полифракционная шлаковая добавка, прочность, теплопроводность, ресурсоэффективность, промышленная апробация, внедрение.

Использование отходов промышленного производства для конструирования новых композиционных материалов особенно актуально в регионах с развитым металлургическим производством [1, 2].

Металлургическое производство сопряжено с большим объемом промышленных отходов, в том числе шлаков. Вместе с тем, важно понимать, что шлак, образующийся при выплавке стали, является ценным сырьем. На сегодняшний день доля перерабатываемых шлаков составляет от 40 до 48 процентов. В строительстве доменные шлаки и другие вещества чаще играют роль инертных заполнителей, что экономически неоправданно, учитывая ограниченность естественных ресурсов сырья для производства цемента.

Металлургические предприятия занимаются переработкой своих собственных шлаков. Не переработанные отправляются на размещение на промышленные полигоны. На Череповецком металлургическом комбинате компании ПАО «Северсталь» ежегодно образуется до 7 миллионов тонн отходов, в том числе отсев фракцией менее 5 мм, получаемый при производстве фракционированного шлакового щебня. Использование отсева ограничивает отсутствие сертификатов и технологических регламентов [4].

С увеличением масштабов строительства очевидной становится необходимость изучения вопросов управления свойствами бетонов на основе металлургических шлаков, так как сырье для производства таких бетонов является массовым, относительно дешевым и пригодным для изготовления широкого ассортимента изделий [2, 3].

Процесс проектирования состава состоял в постановке общей задачи и рассмотрении проектируемого объекта в качестве единой системы, в которой отражены основные требования к составу бетона. Целью была разработка мелкозернистого шлакобетона с использованием отходов металлургического производ-

ства, с заданными прочностными и теплозащитными характеристиками и применимого для производства железобетонных конструкций как методом опалубочного, так и безопалубочного формования.

Одним из основных способов создания бетонов является комбинирование различных компонентов [2]. Разработка опытного состава велась с целью достижения оптимального физико-химического взаимодействия компонентов. На начальном этапе было создано три опытных состава с одинаковыми компонентами, но в разных пропорциях фракций. На основе проведенных испытаний был выбран оптимальный состав.

Основной упор при выборе состава делался на установление высокой химико-минералогической однородности шлакобетона. В качестве вяжущего был применен Пикалевский цемент, в качестве заполнителя мелкозернистого бетона – шлаковый песок, в качестве добавки – помол шлакового песка и отсева шлакового щебня. Активная тонкомолотая добавка введена в состав бетона с целью замещения 30 % вяжущего, без потери свойств. Введение добавки является важным этапом, поскольку современными трендами развития мировой цементной отрасли является:

- снижение энергоемкости производства портландцемента и уменьшение экологической нагрузки на окружающую среду,

- оптимизация процессов структурообразования за счет введения активных минеральных добавок в качестве компонента при помолу вяжущего, позволяющая увеличить ресурсы вяжущих.

Производство полифракционной шлаковой добавки осуществлялось совместным помолом шлакового песка и отсева шлакового щебня, в процентном соотношении 70 на 30 в электрической шаровой мельнице. Во время работы мельницы металлические шары, находящиеся в ней, трением смешивают и перемалывают компоненты до однородной сыпучей массы. По-

мол осуществляется на протяжении 6 часов, после чего материал просеивается через сито, во избежание попадания крупных не перемолотых частиц и металлических шаров из мельницы. Измеряется тонкость помола. Готовая тонкомолотая добавка представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Полифракционная шлаковая добавка

Системность работы заключается в выборе и следовании определенному направлению производства бетона. Схема выбранного направления представлена на рисунке 2.

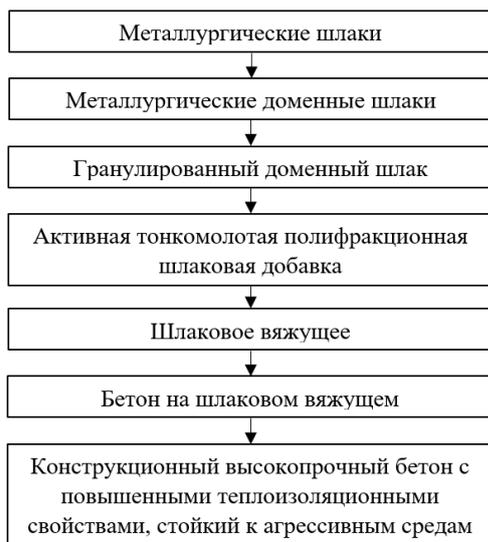


Рис. 2. Схема направления проектирования состава

В качестве железобетонных изделий для внедрения состава в производство были выбраны сборные железобетонные перемычки 1ПБ-13-1П с габаритными размерами 1290×120×65 мм (представлены на рис. 3). Данный вид железобетонных изделий является широко применимым в строительном производстве и наименее материалоемким. Перемычки изготавливают на заводах сборного железобетона и в готовом виде доставляют на строительную площадку для их монтажа. Они применяются в строительстве зданий и сооружений для перекрытия дверных и технологических проемов. Рассчитаны на работу под статическими и динамическими нагрузками при сгибающих и сжимающих деформациях.

Производство осуществлялось на специально оборудованной линии в закрытом цехе завода железобетонных изделий и конструкций предприятия ПАО «ЗЖБИиК».

На начальном этапе производства состава мелкозернистого шлакобетона осуществляется доставка компонентов в производственный цех. Доставка сыпучих материалов выполняется автотранспортом. Отдельные компоненты загружаются в емкости для хранения. Приготовление бетонной смеси представляет собой точное дозирование и смешивание исходных материалов и должно обеспечить получение однородной системы. Количественный состав мелкозернистого шлакобетона представлен в таблице 1.

Таблица 1

**Количественный состав мелкозернистого шлакобетона на 1 м<sup>3</sup>**

№ п/п	Компонент	Содержание компонента, %	Масса компонента, кг/м <sup>3</sup>
1	Цемент М500 производства «Пикалевский цемент» ЦЕМ I 42,5Н	20,1	378,6
2	Шлаковый песок производства ПАО «Северсталь»	60,5	1136,7
3	Полифракционная шлаковая добавка, компоненты производства ПАО «Северсталь»	8,66	162,8
4	Вода водопроводная	10,74	202

Производство сборных железобетонных конструкций на основе мелкозернистого шлакобетона отличается от производства конструкций из обычного бетона лишь используемыми в составах компонентами. Разработанный состав имеет требуемую удобоукладываемость, соответствующую способу уплотнения. Для производства сборных железобетонных перемычек в качестве уплотнения бетонной смеси применяется вибрирование. При укладке в металлические формы состав сохраняет изначальную однородность. Это является отличительной особенностью мелкозернистых бетонов. Особенностью разработанного состава является повышенная жесткость смеси, но в целом это не влияет на удобоукладываемость и тиксотропию, а лишь требует несколько большего по времени вибрирования. Жесткость бетонной смеси была определена согласно [8]. Требуемая осадка конуса для малоармированных конструкций должна быть в пределах 2–4 мм [6]. Осадка конуса испытываемого состава составила 1–2 мм. Исходя из полученных значений, можно говорить о том, что разработанный мелкозернистый шлакобетон имеет жесткость Ж1. Вибрирование состава осуществляется с соблюдением техники безопасности (все рабочие покидают зону вибрационных площадок). Состав равномерно распределяется по формам, занимая 2/3 объема. Вибрационные площадки выключают. Начинается второй этап подачи состава в формы. После его завершения вибрационные площадки включают вновь. Состав полностью заполняет объем форм. Площадки отключаются. Рабочие убирают излишки состава. Далее мостовым краном формы складываются в паллеты. Окончательный набор прочности конструкции получают после обработки в пропарочных камерах. После этого производится распалубка форм. Готовые перемычки представлены на рисунке 3.

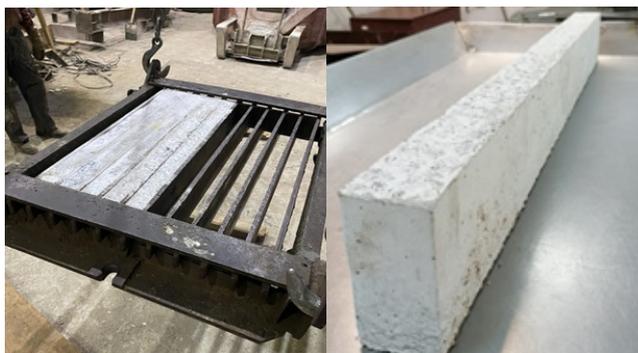


Рис. 3. Производство перемычек ПБ-13-1П

Испытания перемычек нагружением для контроля их прочности, жесткости и трещиностойкости проводились по достижении бетоном прочности, соответствующей его классу по прочности на сжатие.

На прочностные характеристики мелкозернистого шлакобетона оказывает весомое влияние его структура. Преимуществом мелкозернистого шлакобетона, а именно структуры цементного камня с высокой удельной поверхностью новообразований, является

то, что в ней сглаживаются типы условных микротрещин, уменьшаются их размеры, снижается концентрация напряжений, а прочностные и упругопластичные свойства, наоборот, имеют более высокие показатели [1].

В доказательство этого были проведены испытания образцов призм и кубов на сжатие. Испытания проводились по прошествии 28 суток. Кубиковая прочность на сжатие тяжелого шлакобетона на полифракционном шлаковом вяжущем составила 46,0 МПа, что соответствует классу бетона В35 по [9]. Испытания призмной прочности шлакобетона производились нагружением ступенями. График зависимости деформаций от уровня напряжений представлен на рисунке 4. Рост деформаций наблюдается после нагружения до 20 000 кгс/см<sup>2</sup>, а после 40 000 кгс/см<sup>2</sup> рост деформаций снижается. Разрушающая нагрузка составила 79 750 кгс/см<sup>2</sup> или 7820 МПа.

Испытания на теплопроводность производились этапами, после каждой ступени нагружения призмы. На основе полученных показателей теплопроводности бетона составлен график зависимости теплопроводности от нагрузки (рис. 5).

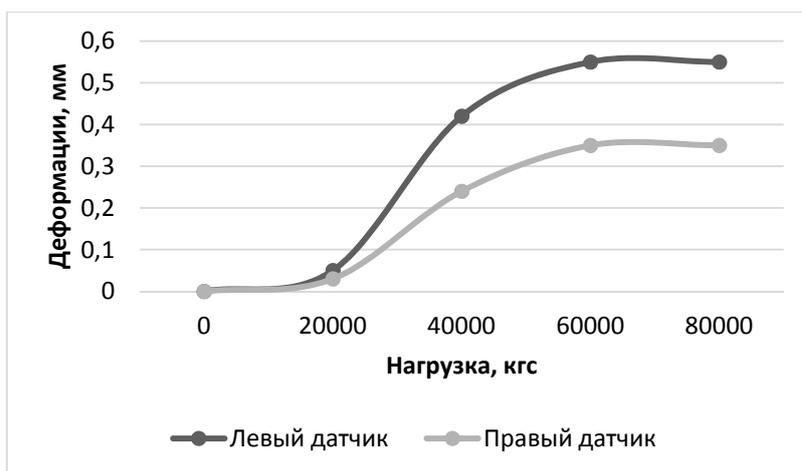


Рис. 4. График зависимости деформаций от уровня напряжений

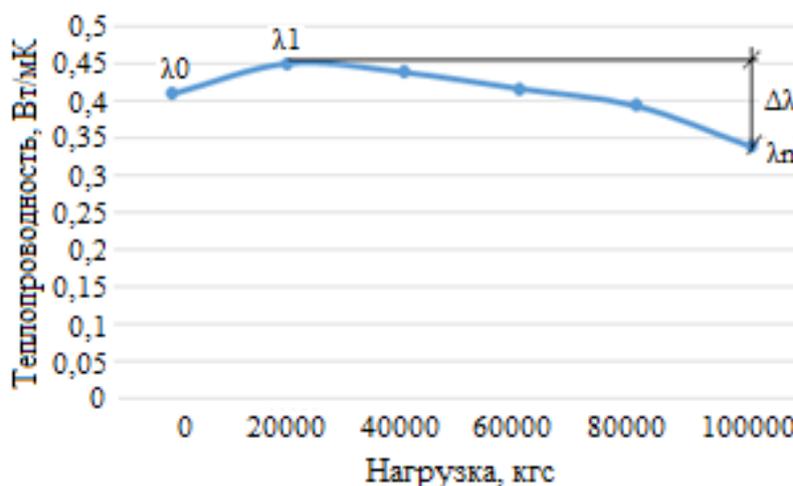


Рис. 5. График зависимости теплопроводности от нагрузки

Данный график демонстрирует, что изначально, под действием нагружения, теплопроводность возрастает, достигает определенного максимума, а затем снижается. Это обусловлено тем, что образующиеся в шлакобетоне микротрещины создают дефектность структуры, которая, в свою очередь, препятствует переносу тепловой энергии. Значение  $\Delta\lambda(t)$  составляет 0,11 Вт/мК, что способствует уменьшению теплопроводности бетона и увеличению эксплуатационных характеристик конструкций.

Исходя из полученных результатов испытаний, можно судить о синергетическом эффекте повышения эксплуатационных свойств бетона. Повышенные прочностные характеристики позволяют осуществить производство широкого ассортимента конструкций, а повышенные теплозащитные характеристики позволят снизить затраты на теплозащиту конструкций.

Сложившаяся в России практика применения отходов промышленности ориентирована на использование металлургических шлаков в качестве заполнителей (шлаковый щебень, гранулированный шлак, шлаковая пемза, шлакоминеральные смеси) [7]. В разработанном составе тяжелого мелкозернистого шлакобетона на полифракционном шлаковом вяжущем содержатся такие компоненты, как шлаковый песок и отсев шлакового щебня. Отсев в больших количествах содержится в отвалах на площадях ПАО «Северсталь». Внедрение состава в производство позволит задействовать большое количество неиспользуемого сырья, что повлечет за собой выгоду для предприятия.

В результате промышленной апробации состава мелкозернистого шлакобетона можно сделать вывод о его пригодности для производства сборных железобетонных изделий, в частности железобетонных перемычек. Это подтверждается полученным на предприятии ПАО «ЗЖБИиК» актом о внедрении состава в производство и проведенными испытаниями.

*A.V. Kopyltsov, I.V. Pavlushkov, O.A. Povarova*  
*Cherepovets State University*

## **INDUSTRIAL APPROBATION OF THE FORMATION OF REINFORCED CONCRETE LINKS FROM POLYFRACTIONAL FINE-GRAINED SLAG CONCRETE**

The article presents the results of the studies on the possibility of using slag-containing binders in the production of structural concrete. The developed composition of fine-grained slag concrete was used in the production of prefabricated reinforced concrete lintels. The peculiarity of the composition is that it uses slag sand as a filler. Part of the cement is replaced by a finely ground polyfraction slag additive. The additive production is carried out by joint grinding of slag sand and screening of crushed slag. The manufactured structures meet the necessary requirements for strength and thermal conductivity. Industrial testing of the formation of reinforced concrete lintels from polyfraction fine-grained slag concrete has shown the possibility of introducing the developed composition into mass production.

Fine-grained slag concrete, reinforced concrete bulkheads, screening of crushed slag, polyfractional slag additive, strength, thermal conductivity, resource efficiency, industrial testing, implementation.

## **Литература**

1. Гатылюк, А. Г. Определение оптимального состава мелкозернистого шлакобетона на отходах металлургического производства / А. Г. Гатылюк, В. С. Грызлов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – Т. 1. – № 2 (47). – С. 9–11.
2. Грызлов, В. С. Формирование структуры шлакобетонов : монография / В. С. Грызлов. – Череповец : ЧГУ, 2011. – 274 с.
3. Утилизация металлургических шлаков: учебное пособие / В. С. Грызлов, А. Г. Каптюшина, А. И. Фоменко [и др.]. – Череповец : ЧГУ, 2012. – 158 с.
4. Грызлов В. С. Отсев дробления шлакового щебня как эффективный компонент бетона / В. С. Грызлов, Д. В. Завьялова // Строительные материалы. – 2018. – № 5. – С. 40–43.
5. Концепция утилизации малоактивных компонент бетонных смесей / Ю. В. Дмитрак, С. А. Масленников, В. Х. Дзапаров, Б. В. Дзеранов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2020. – № 11–12. – С. 47–53.
6. Зоткин, А. Г. Бетон и бетонные конструкции : учебное пособие / А. Г. Зоткин. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2012. – 335 с.
7. Попов, В. Г. Создание строительных материалов на основе отходов / В. Г. Попов, А. В. Попов, В. Н. Кротов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2017. – № 5–6.
8. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытания : межгосударственный стандарт : введен 2015-07-01. – Текст : электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 10.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
9. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые : межгосударственный стандарт : введен 2016-09-01. – Текст : электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 10.06.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.