

## НОВЫЕ ВЯЖУЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

*В. С. Руднов, В. А. Беляков*

*(Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, Россия, rudnovV@yandex.ru; 9222283482@mail.ru)*

Бетон — композиционный материал, состоящий из смеси затвердевшего вяжущего вещества и заполнителей, благодаря варьированию соотношения компонентов приобретает требуемые разнообразные свойства в широком диапазоне. Благодаря технологической легкости получения заданных характеристик бетонные конструкции наиболее распространены, а ежегодный мировой объем производства бетонных смесей приближается к 5 млрд. м<sup>3</sup> [1].

Промышленность строительных материалов оказывает существенное воздействие на окружающую среду, которое определяется колоссальными объемами производства материалов для строительства. В настоящее время для улучшения экологической обстановки находят все большее распространение ресурсосберегающие технологии, в которых в качестве сырьевых компонентов возможно использование техногенных отходов или продуктов их переработки, что в условиях промышленного производства дает существенный экономический и ресурсосберегающий эффекты. Например, при производстве портландцемента расходуется до 5 % мирового производства энергоресурсов [2]. Благодаря огромному объему изготовления бетонных смесей применение ресурсосберегающих технологий вторичной утилизации отходов весьма актуально.

Применение металлургических шлаков в качестве мелкого и крупного заполнителей тяжелого бетона достаточно изучено и внедрено в промышленное производство многих стран. В промышленности строительных материалов наиболее перспективный путь снижения энергоемкости производства — это замена портландцемента на безобжиговые вяжущие щелочной активации, что дополнительно дает экологический эффект. Экономическая эффективность их производства также высока за счет отсутствия необходимости капитальных вложений в производственное оборудование, разработку месторождений, энергозатратные технологические операции.

Коммерческое производство шлакового цемента началось в Германии в 1865 году, а уже с 1880 года все более интенсивно шлакощелочной цемент использовали во всей Европе, в том числе для строительства Парижского Метрополитена. Европейскими лидерами производства этого цемента являются Великобритания и Нидерланды, также в Европе этот вид вяжущего является приоритетным средством сокращения воздействия на окружающую среду.

**Материал и теоретические основы исследования.** Шлакощелочной цемент — это гидравлическое высокопрочное вяжущее, состоящее из тонкомолотого шлака с преобладанием в составе CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (суммарное содержание достигает 95 %) и щелочного активатора твердения (сода, жидкое стекло и т. д.) [1]. При получении шлакового цемента используют гранулированные шлаки — доменные, электротермофосфорные и цветной металлургии. Необходимое условия возможности использования шлаков — это наличие стекловидной фазы, взаимодействующей со щелочами в процессе твердения и высокая удельная поверхность не менее 300 м<sup>2</sup>/кг.

При увеличении содержания в шлаке мелких частиц повышается скорость твердения и прочность вяжущего за счет увеличения числа дефектов структуры и образования на поверхности участков, обладающих большим запасом избыточной поверхностной энергии. В качестве щелочного компонента чаще всего применяют каустическую и кальцинированную соду, поташ, растворимый силикат натрия, а также различные техногенные щелочные отходы, что позволяет получать значительные объемы шлаковых вяжущих. Оптимальное содержание щелочных соединений в вяжущем составляет 2–5 % от массы шлака.

По сравнению с соединениями кальция высокая активность соединений щелочных металлов дает возможность получить быстротвердеющие, высокопрочные вяжущие. Наличие щелочей интенсифицирует разрушение и гидролитическое растворение шлакового стекла, образование щелочных гидроалюмосиликатов и создание среды, способствующей образованию и высокой устойчивости низкоосновных кальциевых гидросиликатов. Малая растворимость новообразований, стабильность структуры во времени определяют долговечность шлакощелочного камня.

При использовании шлакового цемента в производстве бетона у получающейся структуры цементного камня намного меньше капиллярных пор, чем у бетона на обычном портландцементе.

Отличие данного вяжущего от портландцемента заключается в повышенных характеристиках водонепроницаемости, морозостойкости, и пониженных показателях усадки и ползучести.

В Институте новых материалов и технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина разработан шлакощелочной цемент, состоящий на 97 % из техногенных отходов Уральского региона [3]. Минеральный компонент – молотый доменный гранулированный шлак, отход местного металлургического производства компании «Мечел-материалы».

Доменный гранулированный шлак является техногенным отходом при выплавке железной руды, который производят путем быстрого водного охлаждения шлакового расплава. Выпуск молотого шлака стал возможен с установкой на «Мечел-материалы» современного помольного оборудования – вертикальной валковой мельницы с одновременной сушкой австрийской компании Loesche. Помол материала происходит под высоким давлением с помощью вала перекачивающегося по столу, а вынос материала с помощью центробежного сепаратора, что позволяет получить продукт с высокой удельной поверхностью – 450 м<sup>2</sup>/кг. Измельченный в центробежно-ударной мельнице шлак имеет частицы изометрической формы с аморфизированной поверхностью, что повышает активность шлака.

Главная масса доменного гранулированного шлака – это стекловидная фаза, доля которой колеблется от 66,6 до 95 %. В шлаках кристаллизуются минералы – двухкальциевый силикат, меллит, терфоит (табл. 1).

Таблица 1

**Химический состав молотого доменного гранулированного шлака и отхода керамического производства, %**

Материал	Содержание, %						
	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	SO <sub>2</sub>
Шлак	35,7	40,1	5,5	14,4	0,9	1,2	1,5
Отходы керамического производства	83,8	0,9	1,1	7,7	3,4	–	0,2

Модуль основности – характеристика активности металлургических шлаков и устойчивости их при известковом распаде, определяется отношением содержания в шлаке основных оксидов к содержанию кислых по формуле:

$$M_0 = \frac{(CaO + MgO)}{(SiO_2 + Al_2O_3)}, \quad (1)$$

где CaO, MgO – содержание в шлаке соответствующих основных оксидов,

SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – содержание в шлаке соответствующих кислых оксидов.

Для шлаков с модулем основности больше единицы могут применяться все щелочные соединения или их смеси. Модуль основности исследуемого молотого доменного гранулированного шлака составляет 0,96, поэтому шлак относится к кислым и не подвержен известковому распаду. Физические характеристики молотого доменного гранулированного шлака приведены в табл. 2.

Щелочной активатор – жидкое стекло, изготовленное полупромышленным способом с варьируемыми качественными характеристиками (кремнеземистый модуль от 1,3 до 1,7, плотность 1500 кг/м<sup>3</sup>) из отхода керамического производства Свердловской области (табл. 1). Содержание сухого вещества в жидком стекле 35 %.

Таблица 2

**Физические характеристики молотого доменного гранулированного шлака**

Характеристика	Параметр
Содержание фракции <80 мкм	96,0
Содержание фракции <20 мкм	60,0
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	450
Модуль основности	0,96
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	2850
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1140

Получение жидкого стекла по разработанной технологии заключается в нескольких простых технологических операциях:

- получение смеси порошкообразного отхода с 30 % раствором NaOH;
- низкотемпературная обработка (90–95 °С) с постоянным перемешиванием в течение 4–6 часов;

– охлаждение полученного минерального жидкого стекла.

Свойства шлакового цемента регулируются изменением содержания компонентов и зависят от вида, минерального состава и удельной поверхности шлака, вида и концентрации раствора щелочного компонента. Водовязущее отношение и вид активизатора влияет на прочность шлакового цемента. В ходе экспериментальных лабораторных исследований было изучено влияние характеристик и соотношения компонентов на реологические, структурные и прочностные характеристики шлакощелочного цемента:

- зависимость скорости структурообразования от кремнеземистого модуля жидкого стекла;
- влияние плотности и концентрации жидкого стекла на реологические характеристики цементного теста;
- для жидких стекол с различными силикатными модулями воздействие содержания жидкого стекла на прочность на сжатие затвердевшего шлакощелочного композита (рис.).

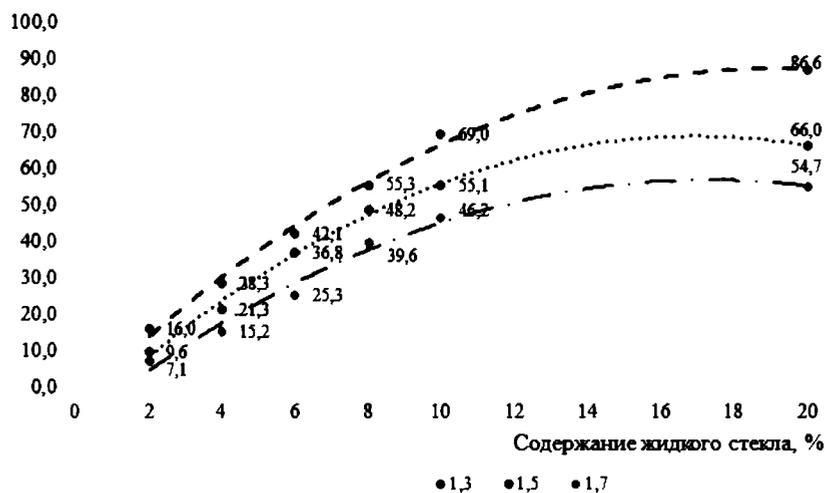


Рис. Зависимость прочностных характеристик шлакощелочного цемента от содержания жидкого стекла с различными силикатными модулями

В ходе экспериментов установлено:

- микроскопическими и реологическими исследованиями выявлено, что увеличение содержания и снижение силикатного модуля жидкого стекла ускоряет процессы структурообразования при твердении шлакощелочного цемента;
- увеличение содержания жидкого стекла в пределах от 2 до 20 % повышает прочность на сжатие и прочность на изгиб шлакощелочного цемента до 380 % при прочих неизменных условиях;
- оптимальное соотношение шлака и жидкого стекла с кремнеземистым модулем 1,3 составляет 1 : 4, что позволяет получить гидравлическое вяжущее с прочностью на сжатие 86 МПа при твердении в течение 28 суток в воздушно-влажных условиях.

**Заключение.** В Институте новых материалов и технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина проведены исследования и получен шлакощелочной цемент – альтернатива портландцементу. При этом в ходе исследований изучено влияние свойств и соотношения компонентов на качественные характеристики конечного цемента и оптимизирован его состав.

Результатом исследований является бесцементное высокопрочное гидравлическое вяжущее (шлакощелочной цемент) состоящее на 97 % из техногенных отходов Уральского региона. Проведенный экономический расчет материальных затрат и лабораторные испытания свидетельствуют о практической возможности и экономической целесообразности промышленного производства шлакового цемента.

#### Список литературы

1. P.-C. Aitcin. High Performance Concrete. E&FN Spon. 2004. – 140 p.
2. Корнеева Е. В., Павленко С. И. Бесцементное вяжущее из техногенных отходов для золошлаковых смесей // Сухие строительные смеси. – 2008. – № 2. – С. 54–55.
3. Носков А. С., Руднов В. С., Девятых И. А. Энергоэффективная технология производства шлакощелочного вяжущего как альтернатива портландцементу // Экономические и технические аспекты безопасности строительных критических инфраструктур: Труды межд. конф. – Екатеринбург, 2015. – С. 140–143.