

УДК 666.973.6/666.972.16

**Е. И. Барановская, А. А. Мечай**

Белорусский государственный технологический университет

**ТЕХНОЛОГИЯ АВТОКЛАВНОГО ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА**

Разработана ресурсосберегающая технология автоклавного ячеистого бетона с использованием очищенного от металлических включений электросталеплавильного шлака. Подготовка шлака заключалась в его сушке, помоле и очистке от металлических включений с помощью сушильно-измельчительно-обогащительного комплекса, изготовленного в ОАО «НПО “Центр”». Затраты электроэнергии на измельчение шлака до номинальной крупности 0,01 мм составляли около 30 кВт/т, влажность материала после сушки – не более 0,5%. Молотый шлак характеризовался удельной поверхностью 450–500 м<sup>2</sup>/кг.

Оптимизированы составы автоклавного ячеистого бетона с марками по плотности D200–D500 с использованием электросталеплавильного шлака взамен 30–100 мас. % портландцемента. Установлено, что введение шлака в ячеистобетонную смесь обеспечивает изменение состава и структуры продуктов твердения бетона за счет повышения кристаллизационной способности низкоосновных гидросиликатов кальция. Указанные соединения вследствие своих морфологических особенностей способствуют образованию дополнительного кристаллического каркаса и производят микроармирование межпоровых перегородок, что повышает их прочность. Максимальной прочностью по сравнению с контрольными обладают образцы ячеистого бетона с заменой 70–100 мас. % портландцемента на шлак.

**Ключевые слова:** ячеистый бетон, электросталеплавильный шлак, сушильно-измельчительно-обогащительный комплекс, ресурсосберегающая технология, автоклавная обработка, структура.

**Ye. I. Baranovskaya, A. A. Mechay**

Belarusian State Technological University

**TECHNOLOGY OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE  
USING ELECTRIC FURNACE SLAG**

Resource-saving technology of autoclaved aerated concrete using electric furnace slag purified from metal inclusions was developed. Preparation of slag consisted of drying, grinding and refining of metal inclusions using drying and grinding and concentrating complex, produced by Open Joint Stock Company “NPO “Center””. The electricity consumption for slag grinding to the nominal fineness of 0,01 mm was approximately 30 kWh/t, material moisture content after drying – not more than 0,5%. Ground slag is characterized by a specific surface area of 450–500 m<sup>2</sup>/kg.

Optimized autoclaved aerated concrete compositions with grades of concrete density D200–D500 using electric furnace slag in exchange for 30–100 wt% of portland cement. It has been established The introduction of slag into the aerated concrete mix changes composition and structure of concrete hardening products by increasing the crystallization ability of low-basic hydrated calcium silicates. These compounds contribute to the formation of additional crystalline framework and produce the microreinforcement of interporous partitions, which increases their strength. Aerated concrete samples with the replacement of 70–100 wt% of portland cement to slag have the maximum strength in comparison with control samples.

**Key words:** aerated concrete, electric furnace slag, drying and grinding and concentrating complex, resource-saving technology, autoclave treatment, structure.

**Введение.** В настоящее время в связи с проблемой сбыта продукции для предприятий-производителей автоклавного ячеистого бетона актуальной задачей является снижение его себестоимости. Учитывая высокую долю энергоемких сырьевых компонентов (известки и цемента) в составе ячеистобетонных смесей, использование техногенных отходов, обеспечивающих максимально полное их замещение, является перспективным направлением.

В Республике Беларусь имеется такой крупнотоннажный отход, как электросталеплавиль-

ный шлак. В отвалах Белорусского металлургического завода накоплено около 10 млн т шлака с ежегодным приростом 200–250 тыс. т. На сегодняшний день только 40–50% от общей массы шлаков используется для подсыпки дорог. Оставшиеся 50–60%, представляющие собой фракцию 0–5 мм, накапливаются в отвалах. Проблема эффективного использования электросталеплавильного шлака в составе строительных материалов заключается в наличии в его составе тонкодисперсных стальных включений, которые не поддаются магнитной сепарации и значи-

тельно затрудняют помол материала, а при гидросиликатном твердении вызывают разупрочнение структуры продуктов гидратации вяжущих веществ. Кроме того, при неполной гидратации кристаллических фаз шлака со временем происходит силикатный распад (модификационный переход  $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rightarrow \gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), сопровождающийся увеличением объема кристаллической решетки на 10–12% и саморассыпанием [1].

Исследования, проведенные на кафедре химической технологии вяжущих материалов Белорусского государственного технологического университета, показали возможность эффективного использования электросталеплавильного шлака в качестве сырьевого компонента автоклавного ячеистого бетона при условии удаления тонкодисперсных стальных включений [2–3]. Установлено, что при медленном охлаждении шлакового массива происходит достаточно быстрая и равномерная кристаллизация по всему его объему. Высокое содержание кристаллической фазы в шлаке (объемная доля 0,75–0,80) предопределяет его пониженную гидратационную активность в обычных условиях твердения. В то же время гидротермальная обработка с одновременной химической активацией может обеспечить максимально полную гидратацию не только стеклофазы, но и кристаллических минералов, которые в обычных условиях твердения проявляют слабую вяжущую способность либо являются инертными.

В рамках выполнения задания Государственной программы освоения в производстве новых и высоких технологий на 2011–2015 годы проводились исследования, направленные на разработку и внедрение ресурсосберегающей технологии автоклавного ячеистого бетона с использованием очищенного от металлических включений электросталеплавильного шлака. Основными задачами являлись: разработка эффективной технологии помола и очистки шлака с применением сушильно-измельчительно-обогащительного комплекса; разработка ресурсосберегающих составов ячеистобетонных смесей с частичной и полной заменой цемента на шлак; изучение физико-механических свойств бетона; освоение производства автоклавного ячеистого бетона разработанных составов.

**Основная часть.** В качестве сырьевых материалов для получения ячеистого бетона автоклавного твердения с марками по плотности D200–D500 в соответствии с СТБ 1570–2005 использовали портландцемент марки М500, известь негашеную кальциевую с содержанием активных CaO и MgO 72–73 мас. %, песок молотый кварцевый с содержанием общего SiO<sub>2</sub> не менее 85 мас. %, порообразователь – алюминиевую пудру ПАП-1. В состав сырьевых сме-

сей вводили молотый электросталеплавильный шлак Белорусского металлургического завода (ОАО «БМЗ – Управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин). Дозировка шлака составляла 30–100 мас. % взамен цемента. В качестве контрольных приняты образцы без добавки шлака, составы сырьевых смесей которых рассчитывались на получение ячеистого бетона с марками по плотности D200–D500 в соответствии с рецептурой Филиала № 5 «Гродненский КСМ» ОАО «Красносельскстройматериалы».

Формование изделий осуществлялось литьевым способом при водотвердом отношении (В/Т) смеси 0,56, гидротермальная обработка образцов проводилась в автоклаве Гродненского КСМ при избыточном давлении насыщенного водяного пара 1,0 МПа, температуре 179°C и времени выдержки при рабочем давлении 8 ч.

Разработка конструкторской и технической документации, изготовление сушильно-измельчительно-обогащительного комплекса КСИ-0,4.001.00.00.000 проводились в ОАО «НПО «Центр» (г. Минск). Схема измельчительного комплекса отображена на рис. 1, фотографии установки, размещенной на производственной площадке ОАО «НПО «Центр», представлены на рис. 2.

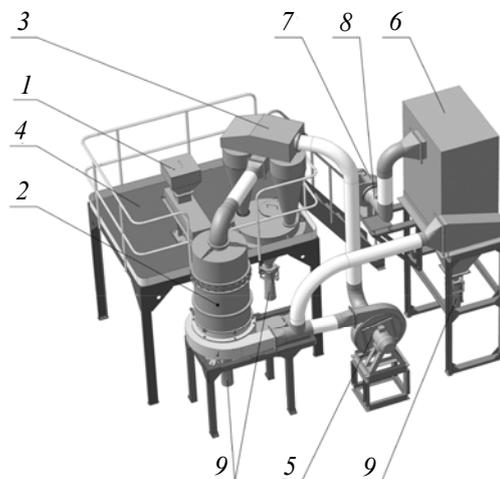


Рис. 1. Схема измельчительного комплекса ОАО «НПО «Центр»:  
1 – бункер с питателем; 2 – мельница центробежная КИ-0,4; 3 – циклон; 4 – площадка; 5 – вентилятор транспортный; 6 – фильтр рукавный ФПС-04; 7 – вентилятор аспирационный; 8 – шибер регулировочный; 9 – затвор рукавный

Комплекс для помола и очистки шлака от металла состоит из сушильного отделения, главным элементом которого является сушильный барабан, и измельчительного, включающе-

го центробежную мельницу со встроенным классификатором.



а



б

Рис. 2. Фотографии сушильно-измельчительно-обогащительного комплекса КСИ-0,4.001.00.00.000: а – сушильный барабан; б – центробежная мельница со встроенным классификатором

Способ центробежно-ударного измельчения, реализуемый в указанном измельчительном комплексе, позволяет получить материал, характеризующийся качественными показателями, труднодостижимыми с помощью других видов измельчения. Полученный продукт обладает высокой удельной поверхностью и физико-химической активностью частиц за счет однородной изометрической формы с хорошо развитой поверхностью, имеет гранулометрический состав, характеризующийся содержанием частиц размером 10–35 мкм более 45 мас. %. Температура газов на выходе из сушилки составляет не более 130°C, влажность материала после сушки – не более 0,5%. Затраты электроэнергии на измельчение шлака до величины

зерен 0,01 мм составляют около 30 кВт/т. Учитывая, что содержание металлических включений в исходном материале колеблется в пределах 2–8%, в процессе измельчения с помощью воздушной классификации производится практически полная его очистка. Основными преимуществами комплекса являются: высокие показатели работы; простота и удобство обслуживания; малая занимаемая площадь; низкая энергоемкость (снижение расхода электроэнергии в 2–2,5 раза по сравнению с шаровыми мельницами); возможность регулирования тонкости помола готового продукта; отсутствие переизмельченных классов за счет итерационного цикла работы комплекса. Производительность комплекса составляет до 0,5 т/ч. Ориентировочная стоимость подготовленного шлака – 6–8 у. е. за 1 т.

Молотый сталеплавильный шлак, подготовленный с помощью сушильно-измельчительно-обогащительного комплекса, представляет собой порошок с удельной поверхностью 450–500 м<sup>2</sup>/кг (рис. 3). Распределение частиц в указанных диапазонах (мкм) следующее, мас. %: 0–1 – 1,76; 1–5 – 14,08; 5–10 – 21,13; 10–35 – 47,53; 35–70 – 15,50.

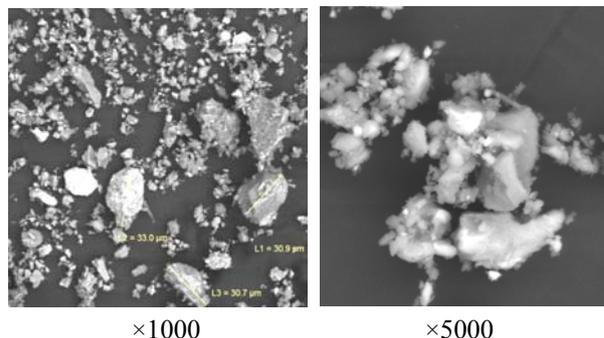


Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки порошка шлака

диапазон колебания химического состава молотого шлака представлен в таблице.

**Диапазон колебания химического состава шлака**

Содержание оксидов, мас. %					
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO
43,0–55,0	18,0–24,0	5,5–9,0	8,0–13,0	4,0–6,5	1,5–3,0

Анализ данных таблицы показывает, что электросталеплавильный шлак, используемый в работе, является основным (Мо ≥ 1). Минералогический состав по результатам рентгенофазового анализа [2] характеризуется наличием белитовой фазы (β-2CaO · SiO<sub>2</sub>, γ-2CaO · SiO<sub>2</sub>), мервинита, монтичеллита, ранкинита, а также железосодержащих силикатных фаз.

Опытно-промышленные испытания проводились в Филиале № 5 «Гродненский комбинат строительных материалов» ОАО «Красносельскстройматериалы», где было выпущено 3 партии бетона общим объемом 120 м<sup>3</sup>. В соответствии с экономическими расчетами, проведенными специалистами предприятия, установлено, что эффективной является дозировка шлака в сырьевых смесях от 30 мас. % и выше. С точки зрения влияния шлака на физико-механические свойства ячеистого бетона оптимальными составами являются составы с заменой 70–100 мас. % цемента. Зависимость прочности бетона от процента замены цемента представлена на рис. 4.

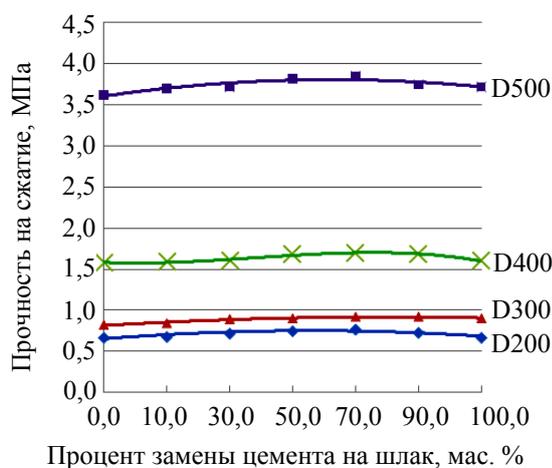


Рис. 4. Зависимость прочности ячеистого бетона от процента замены цемента на шлак

Исходя из результатов эксперимента установлено, что введение молотого шлака в состав сырьевых смесей обеспечивает повышение прочности на сжатие бетона в 1,20–1,25 раза по сравнению с контрольными образцами либо позволяет сохранить прочность на прежнем уровне в зависимости от плотности бетона и дозировки шлака. Оптимизация составов бетона проводилась с учетом требований предприятия к сохранению реологических свойств ячеистобетонных смесей и параметров созревания массива. Полученные образцы прошли испытания в аккредитованной лаборатории ГП «Институт НИИСМ» и соответствуют требованиям СТБ 1570–2005 и ГОСТ 10180–90. Использование молотого шлака позволило получить бетон с марками по морозостойкости F15–F35, снижение коэффициента теплопроводности составило 10–15% в зависимости от состава сырьевых смесей.

Полученные данные по улучшению физико-механических свойств бетона можно объяснить исходя из представлений о щелочной активации шлака при его гидратации в гидротермальных условиях. Установлено, что кристал-

лические фазы шлака медленно гидратируются либо инертны при нормальных условиях, однако в условиях автоклавной обработки их гидравлическая активность значительно повышается.  $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  в присутствии тонкомолотого кварца в автоклаве также подвергается гидратации с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция, обуславливающих улучшение прочностных характеристик бетона.

Микроструктура материала межпоровой перегородки ячеистого бетона оптимального состава (замена 70 мас. % цемента на шлак, повышение прочности в 1,25 раза по сравнению с контрольным образцом) представлена скоплениями гидратных образований различной формы, размеров и степени кристаллизации (рис. 5). Гелеобразная масса гидросиликатной связи пронизана игольчатыми и пластинчатыми кристаллами и их сростками, характерными для низкоосновных гидросиликатов кальция и эттрингитоподобных соединений. Часть кристаллов «прошивают» поровое пространство бетона, что способствует его упрочнению и повышению прочностных свойств готовых изделий. Формирование кристаллов эттрингитоподобных соединений сопровождается разрушением тонкой оболочки на поверхности частиц шлака при его твердении, образованной слабозакристаллизованными гидросиликатами и гидроалюмосиликатами кальция, что ускоряет процесс гидратации.

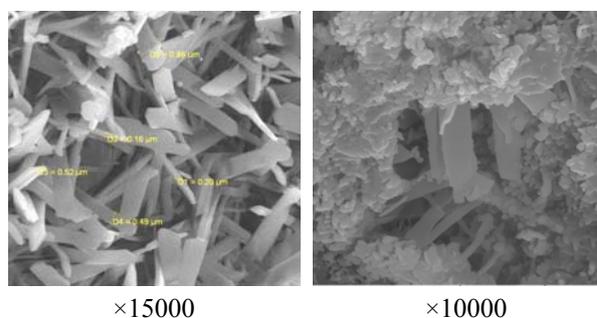


Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки структуры межпоровой перегородки ячеистого бетона

Результаты электронной микроскопии полностью согласуются с данными рентгенофазового анализа [2]. На рентгенограмме образца с содержанием в составе сырьевой смеси 70 мас. % шлака взамен цемента, обладающего максимальной прочностью по сравнению с контрольным, фиксируются дифракционные отражения следующих соединений: низкоосновных гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, тоберморита, ксонотлита, а также высокосульфатной формы гидросульфогидроферрита кальция  $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , которая по своим морфологическим и структурным свойствам аналогична эттрингиту. Для образцов с использова-

нием шлака характерно преобладание низкоосновных гидросиликатов кальция по сравнению с контрольными составами.

**Заключение.** Исследование процессов гидратации и твердения ячеистого бетона показало существенное изменение состава и структуры продуктов химических реакций в присутствии компонентов шлака. Следствием этого является снижение основности гидросиликатов кальция, бóльшая степень их закристаллизованности, образование кристаллогидратов, не характерных для контрольного состава, что способствует формированию плотной межпоровой перегородки и повышению в связи с этим прочности структуры бетона, а также улучшению его других физико-механических свойств. Указанные изменения структуры и свойств являются предпосылкой для повышения показателей долговечности бетона.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана и внедрена в Филиале № 5 «Гродненский КСМ» ОАО «Красносельск-

стройматериалы» ресурсосберегающая технология автоклавного ячеистого бетона с использованием очищенного от металлических включений электросталеплавильного шлака. Указанная технология предусматривает помол и очистку шлака с помощью сушильно-измельчительно-обогащительного комплекса КСИ-0,4.001.00.00.000, изготовленного в ОАО «НПО «Центр»», а также выбор оптимальных составов сырьевых смесей, рассчитанных на получение бетона с плотностью D200–D500. Максимальной прочностью по сравнению с контрольными составами обладают образцы ячеистого бетона с заменой 70–100 мас. % портландцемента на молотый шлак. Такой процент замены цемента в производственных условиях является эффективным с точки зрения улучшения физико-механических и теплофизических свойств материала, а также обеспечивает высокие показатели экономической эффективности от внедрения разработанной технологии на предприятиях по производству автоклавного ячеистого бетона.

### Литература

1. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. 363 с.
2. Мечай А. А., Барановская Е. И., Ласанкин С. В. Автоклавный ячеистый бетон с использованием электросталеплавильного шлака // Труды БГТУ. 2011. № 3: Химия и технология неорган. в-в. С. 40–44.
3. Мечай А. А., Барановская Е. И. Модифицированный автоклавный ячеистый бетон на основе электросталеплавильного шлака // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III Междунар. симпоз. Минск. 2011. Т. 2. С. 369–387.

### References

1. Dvorkin L. I., Dvorkin O. L. *Stroitel'nye materialy iz otkhodov promyshlennosti* [Building materials made of industrial wastes]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2007. 363 p.
2. Mechay A. A., Baranovskaya Ye. I., Lasankin S. V. Autoclaved aerated concrete using electric furnace slag. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 3, Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 40–44 (In Russian).
3. Mechay A. A., Baranovskaya E. I. Modified autoclaved aerated concrete based on electric furnace slag. *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: materialy III Mezhdunar. simpoz.* [Issues of modern concrete and reinforced concrete: materials of International symposium]. Minsk, 2011, vol. 2, pp. 369–387 (In Russian).

### Информация об авторах

**Барановская Екатерина Ивановна** – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры химической технологии вяжущих материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: elf01@tut.by

**Мечай Александр Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой химической технологии вяжущих материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: AA\_M@tut.by

### Information about the authors

**Baranovskaya Yekaterina Ivanovna** – PhD (Engineering), Researcher, the Department of Chemical Technology of binding materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: elf01@tut.by

**Mechay Aleksandr Anatol'yevich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Chemical Technology of Binding Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: AA\_M@tut.by

Поступила 29.02.2016