

## ВИБРОВАКУУМИРОВАННЫЕ ШЛАКОЗОЛОБЕТОНЫ И ЗОЛОБЕТОНЫ

Запропоновано технологію, що дозволяє вирішити актуальну проблему використання шлаків і золи в будівництві. Показано високу ефективність вакуумної обробки бетонів на основі відходів ТЕС, що дає можливість вирішити проблему дефіциту місцевих заповнювачів.

*Ключові слова:* вібровакуумування, шлак і зола ТЕС, режими, формування

Предложена технология, позволяющая решить актуальную проблему использования шлаков и золы в строительстве. Показана высокая эффективность вакуумной обработки бетонов на основе отходов ТЭС, что дает возможность решить проблему дефицита местных заполнителей.

*Ключевые слова:* вибровакуумирование, шлак и зола ТЭС, режимы, формирование

The technology that allows solving an actual problem of application of slag and ash in construction industry is offered. High efficiency of vacuum processing of concrete on the basis of wastes of thermal power plants that gives the opportunity to solve the problem of deficiency of local aggregates is shown.

*Keywords:* vibrovacuumizing, slag and ash of thermal power plant, procedures, moulding

### Постановка проблемы

На современных тепловых электростанциях (ТЭС) при сжигании угля образуются два вида твердых отходов:

– топливный шлак (зернистый материал с крупностью зёрен от 0,16 мм до 20 мм; изредка встречаются более крупные куски);

– зола уноса (дисперсный материал).

При горении топлива крупные частицы не захватываются потоком отходящих газов и оседают вниз, в шлакоосборник, где происходит полное выгорание углеродистых частиц, а минеральная часть переходит в огненно-жидкое состояние (расплав) и сливается в специальную ванную с водой. В результате быстрого охлаждения и высокого давления образующихся водяных паров, крупные куски шлака растрескиваются и распадаются на сравнительно мелкие зерна – гранулы. Оставшиеся крупные куски подаются в дробилку для измельчения, образовавшийся шлак удаляют в отвалы гидравлическим способом.

Мельчайшие частицы потоком газов выносятся из зоны горения и в силу малых размеров быстро охлаждаются. Они из потока уносящих их газов выделяются с помощью системы золоулавливающих устройств. Так образуется зола уноса – один из основных видов отходов ТЭС.

Шлаки тепловых электростанций довольно успешно используются в дорожном строительстве.

Зола ТЭС достаточно хорошо изучены и рекомендованы строителям как активная минеральная добавка при производстве вяжущих

веществ или при приготовлении бетонов и строительных растворов, как минеральный порошок в асфальтобетоны, используют золы при производстве силикатных и керамических изделий. Во всех перечисленных случаях зола используется как добавка в относительно небольшом объеме. Вместе с тем, такое использование золы, как правило, ведет к усложнению технологии, дополнительному технологическому оборудованию, увеличению производственных площадей.

Исходя из этого, актуальной задачей в настоящее время является разработка технологий, способствующих значительному увеличению объемов использования шлаков и золы в строительстве.

### Анализ публикаций

Химический состав золы Приднепровской ТЭС, работающей на углях Донецкого бассейна, полученный в результате обобщения опубликованных данных [1], приведен в табл. 1. Следует отметить, что анализ приведенных данных показывает, что золы основных наиболее крупных тепловых электростанций Украины по своему химическому составу близки между собой. Содержание  $\text{SiO}_2$  находится в основном в пределах 41...54 %. Отклонение от этих пределов наблюдается лишь как частный результат отдельных проб. Содержание оксидов алюминия, железа, кальция и магния также близки. Колебания химического состава золы в указанных пределах не вызывают существенных изменений ее свойств.

Химический состав золы Приднепровской ТЭС

Марки и классы углей	Химический состав, %							НУЧ, %
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO + + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O + + Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	
АШ, АС, АСШ, ПрПр	47...56	18...25	14...20	2...4	1...1,6	3,2...4,5	0,1...0,8	14...26

Модуль основности зол, вычисленный по данным табл. 1, находится, в основном, в пределах 0,04...0,08. Таким образом, золы от сжигания донецких углей относятся к сверхкислым.

Исследования с помощью светового микроскопа показали, что минеральная часть зол ТЭС на 90...92 % состоит из стекла – стекловидной фазы [1]. Основным компонентом этой фазы является кремнезём, который в значительной степени формирует физические и химические свойства золы. Он входит в минеральную часть углей, в остатки от их сжигания (золы, шлаки) и участвует как основной компонент в процессах гидратационного твердения и в процессах синтеза, образуя различные гидросиликаты [2].

Истинная плотность золы уноса Приднепровской ТЭС и других основных электростанций Украины, определенная по методике ГОСТ 9758-86, находится, как правило, в пределах 2,26...2,50 г/см<sup>3</sup>. Насыпная плотность этой золы находится в пределах 0,75...1,05 г/см<sup>3</sup>. Она зависит от гранулометрии, содержания несгоревших углеродистых частиц и восстановленного железа.

Средние результаты ситового анализа сбрасываемых в отвалы зол уноса характеризуются следующими данными: массовая доля остатка на сите с сеткой 016 – 3...9 %, 008 – 8...16 %. Дисперсность зол зависит от ступени золоулавливающих устройств, от которой отбирается проба. На первых ступенях улавливания отбираются сравнительно крупные фракции, характеризующиеся удельной поверхностью 1500...2000 см<sup>2</sup>/г, на последних – наиболее мелкие – 5000...6000 см<sup>2</sup>/г. Средняя дисперсность направляемых в отвалы зол находится в пределах 2600...3800 см<sup>2</sup>/г. В общем случае в результате естественного расслаивания материала на различных участках золоотвалов, формируемых гидравлической системой удаления отходов с ТЭС, оседают и накапливаются золы различной дисперсности, от 1800 до 7000 см<sup>2</sup>/г.

По химическому составу топливный шлак мало отличается от золы уноса соответствующих ТЭС. Различие состоит в том, что в результате дожигания топлива в шлакосборниках

шлаки практически не содержат несгоревших углеродистых частиц. Массовая доля таких частиц, независимо от марки сжигаемого угля, обычно составляет 0,4...0,8 % и редко превышает 1 %. При дожигании содержащихся в золе высокотемпературных остатков происходит углубление восстановительных процессов, в результате чего доля FeO в общей массе оксидов железа возрастает в шлаке до 60...90 % против 20...30 % в золе уноса. Выделяемые при этом газы образуют в шлаке микро- и макропоры [3].

Физико-механические характеристики топливных шлаков от сжигания донецких углей в котлоагрегатах с жидким шлакоудалением имеют следующие значения [4]. Средняя плотность зерен находится в пределах 2,27...2,47 г/см<sup>3</sup>. Колебания плотности связаны с различным значением пористости в отдельных зернах. Истинная плотность шлака, определенная по стандартной методике (ГОСТ 8269), близка к значению 2,60 г/см<sup>3</sup>. Пористость зерен шлака, вычисленная по результатам определения средней плотности зерен и истинной плотности, находится в пределах 6...13 %. Насыпная плотность зависит от плотности зерен, гранулометрии и находится в пределах 1250...1450 кг/м<sup>3</sup>. Прочностные характеристики топливных шлаков, определяемые путем испытания их в цилиндре, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Прочностные характеристики шлаков ТЭС

Размер фракции, мм	Дробимость (по ГОСТ 8269), %	Прочность при сдавливании в цилиндре (по ГОСТ 9758), МПа
3...10	19...26	4,8...5,1
10...20	31...34	3,6...3,8

Из приведенных данных видно, что шлак мелкой фракции прочнее шлака крупной фракции, поскольку крупные зерна шлака имеют больше дефектов в виде крупных пор, раковин и микротрещин.

При испытании шлака на морозостойкость по методике ГОСТ 8269 (фракция 5...10 мм)

потери массы составили 1,85 % – после 50 циклов, 3,8 % – после 100 и 4,9 % – после 200 циклов попеременного замораживания и оттаивания [1].

### Основной материал

Исследованы бетоны на крупном заполнителе (шлаке и гранитном щебне), в которых в качестве мелкого заполнителя использовали кварцевый днепропровский песок и золу. В основу наших исследований положено следующее предположение.

Оптимальный состав бетонной смеси, подвергаемой вакуумированию, должен существенно отличаться от виброуплотняемой. Отличительной особенностью вакуумбетона оптимального состава является его бесконтактное строение, обусловленное избыточным содержанием растворной составляющей за счет повышения доли мелкого заполнителя. Правильный выбор соотношения между мелким и крупным заполнителем (М/К) является важным фактором качества и экономичности вакуумбетона.

Для выявления характера зависимости основных показателей вакуумбетона от соотношения М/К и влияния последнего на ход процесса вакуумирования готовили равноподвижные бетонные смеси (ОК=3...5 см) состава 1 : 6 (Ц : М+К) с расходом цемента 316...330 кг/м<sup>3</sup>, различавшиеся соотношением М/К и расходом воды.

Опытные образцы 15×15×7 см формовали вибровакуумированием и вибрационным способом. Перед вакуумированием бетонную смесь 15 с уплотняли вибрированием. В процессе вакуумирования продолжительностью 6 мин. при разрежении в вакуумпости вакуумщита 0,7...0,75 (полный вакуум принят за единицу) производили периодическое вибрирование по 15 с с интервалом 1...1,5 мин. [5]. Результаты определения прочности образцов через 28 суток нормального твердения приведены на рис. 1 и 2. Данные показывают значительное увеличение прочности для всех видов и составов вакуумбетона в сравнении с виброуплотненным. Оптимальное соотношение М/К, обеспечивающее наибольшую прочность вакуумбетона на кварцевом песке (0,5...0,6), на 25...30 % больше по сравнению с виброуплотненным бетоном (0,4). Вакуумирование (при сравнении оптимальных составов) дало увеличение прочности бетона на 30...40 %. При вакуумировании бетонной смеси, состав которой оптимален для виброуплотнения, это увеличение составило

около 20 %. Следовательно, оптимальный состав бетонной смеси для виброуплотнения не является таковым для вакуумбетона.

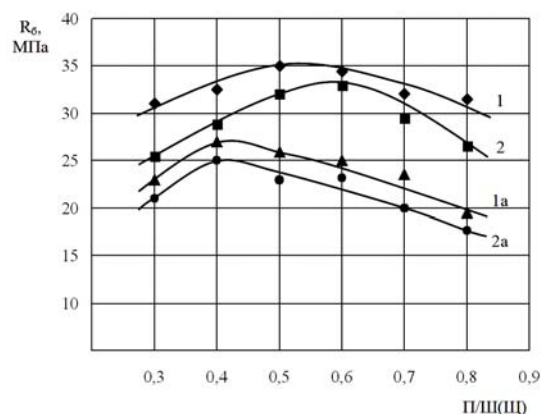


Рис. 1. Прочность бетонов на шлаке и щебне, в которых мелким заполнителем является кварцевый песок:

- 1 – вибровакуумированного на шлаке;
- 1a – то же, виброуплотненного;
- 2 – вибровакуумированного на гранитном щебне;
- 2a – то же, виброуплотненного

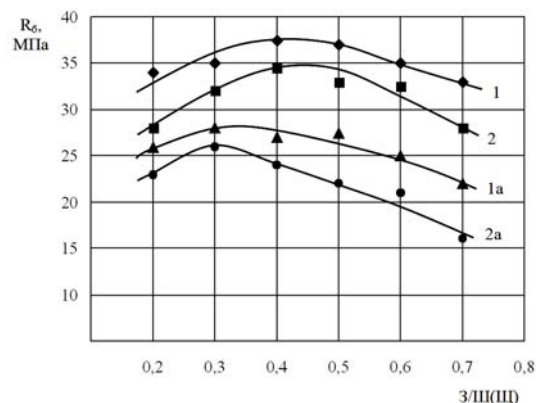


Рис. 2. Прочность бетонов на шлаке и щебне, в которых мелким заполнителем является зола:

- 1 – вибровакуумированного на шлаке;
- 1a – то же, виброуплотненного;
- 2 – вибровакуумированного на гранитном щебне;
- 2a – то же, виброуплотненного

Аналогичные закономерности получены и для бетонов, в которых мелким заполнителем является зола. Только в этом случае оптимальное соотношение М/К для вакуумбетона составляет 0,4, а для виброуплотненных бетонов М/К = 0,3. Следует отметить, что бетоны на шлаке и золе, как вибровакуумированные, так и виброуплотненные, характеризуются большей прочностью, чем эти же бетоны на щебне и кварцевом песке. Это открывает широкие возможности использования шлаков и золы для производства строительных изделий и конструкций, что предоставляет возможность значительного снижения стоимости строительства.

Особенно необходимо отметить актуальность массового использования золы в качестве мелкого заполнителя для бетонов. Это связано не только с необходимостью утилизации огромных объемов данного материала в отвалах, но и с существующим в настоящее время дефицитом традиционного мелкого заполнителя.

При исследовании плотности и прочности золобетонов формовали образцы:

- виброуплотненные из исходной (подвижной) бетонной смеси;
- вибровакуумированные;
- виброуплотненные из жесткой смеси (расход воды в бетоне из жесткой смеси такой же, как и у вибровакуумированного).

В исследованиях использовали не только портландцемент М 400, но и местное вяжущее М 200. Подвижность исходной золобетонной смеси характеризовалась осадкой стандартного конуса – ОК=3...4 см. Из каждого вида бетонной смеси формовали те же образцы, что и в предыдущих опытах, для определения плотно-

сти и прочности в возрасте 28 суток при следующих режимах и способах уплотнения (с учетом ранее выполненных нами исследований) [6]. Из бетонной смеси исходного состава образцы формовали вибрационным способом продолжительностью 25...30 с, при формовании образцов из жесткой смеси продолжительность уплотнения вибрированием составляла 60...65 с; вибровакуумированные – после предварительного виброуплотнения продолжительностью 15...20 с, подвергали вакуумированию при разрежении 0,7...0,8. В процессе вакуумирования применяли периодическое вибрирование (в начале процесса два приема по 10...12 с через 2 мин.). Общая продолжительность вибровакуумирования составляла 9 мин., при этом было удалено 88...110 л воды в пересчете на 1 м<sup>3</sup> вакуумбетона. Все отформованные образцы твердели в нормальных условиях.

Составы бетонов и результаты их испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Состав, плотность и прочность при сжатии золобетонов

Вид золобетона	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>			Количество извлеченной воды, л/м <sup>3</sup>	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа
	Цемент	Зола	Вода			
Цемент М 400						
Виброуплотненный из подвижной смеси	278	1114	368	-	1760 / 1492	5,8
Вибровакуумированный	295	1180	276	110	1751 / 1520	11,7
Виброуплотненный из жесткой смеси	285	1158	274	-	1717 / 1486	8,4
Цемент М 200						
Виброуплотненный из подвижной смеси	291	1107	356	-	1754 / 1460	2,5
Вибровакуумированный	318	1172	261	88	1751 / 1532	4,9
Виброуплотненный из жесткой смеси	312	1166	258	-	1736 / 1517	3,2

**Примечание:** числитель – плотность бетонов после формования, знаменатель – плотность сухих бетонов.

Вибровакуумирование предоставляет возможность повысить прочность золобетона практически в 2 раза, как при использовании цементов М 400, так и М 200. Прочность бетонов из жестких золобетонных смесей больше прочности бетонов из подвижных смесей только на 25...30 %. Это объясняется недостаточным уплотнением вибрационным способом таких смесей [5].

В табл. 4 обобщены обширные результаты исследований авторов и показана зависимость прочности различных видов золобетонов от расхода цемента М 400 (подвижность исходной золобетонной смеси характеризовалась ОК = 3...4 см).

Как видно из приведенных данных, отмеченные ранее закономерности по прочностным характеристикам рассматриваемых бетонов сохраняются при всех принятых в исследованиях расходах цемента. Эти результаты исследова-

ний еще раз подтверждают высокую эффективность вакуумной обработки золобетонных смесей при формовании изделий.

Таблица 4

**Прочность золобетонных в зависимости от расхода цемента и способа уплотнения бетонной смеси**

Вид золобетона	Прочность (МПа) при расходе цемента (кг/м <sup>3</sup> )		
	250	280	360
Вибровакуумированный	8,6	11,8	15,3
Виброуплотненный из подвижной смеси	4,2	5,7	10,1
Виброуплотненный из жесткой смеси	6,3	8,4	12,0

**Выводы**

Рациональные для вакуумирования бетонные смеси, как на шлаке, так и на щебне, отличаются от виброуплотняемых увеличенным на 25...30 % содержанием мелкого заполнителя (на 200 и более кг/м<sup>3</sup>) и, соответственно, увеличенным на 20...40 % соотношением М/К. Вакуумная обработка таких бетонов позволяет повысить прочность на 30...50 %, а при получении равнопрочных бетонов – существенно снизить расход цемента.

Показана высокая эффективность вакуумной обработки золобетонов, как на обычном цементе (М 400), так и на местном вяжущем (М 200) – предоставляется возможность повысить

прочность таких бетонов практически в 2 раза.

Широкое использование бетонов на шлаке и золобетонов в строительстве дает возможность решить проблему заполнителей для бетонов, способствует утилизации отходов ТЭС и, соответственно, охране окружающей среды.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Сергеев, А. М. Использование в строительстве отходов энергетической промышленности [Текст] : монография / А. М. Сергеев. – К.: Будівельник, 1984. – 120 с.
2. Levine, S. Power plant ash – a growing raw material resource [Text] / S. Levine // Modern concrete. – 1978. – v. 41, No. 10. – P. 59-61.
3. Бабачев, Г. Зола и шлаки в производстве строительных материалов [Текст] : монография / Г. Бабачев. – К.: Будівельник, 1987. – 136 с.
4. Горчаков, Г. И. Использование золы гидроудаления в бетоне [Текст] / Г. И. Горчаков, Э. Г. Мурадов, Н. А. Сканава // Бетон и железобетон. – 1976. – № 9. – С. 14-16.
5. Сторожук, Н. А. Вибровакуумная технология золошлаковых бетонов [Текст] / Н. А. Сторожук, Т. М. Павленко // Будівельні конструкції: Міжвідомчий наук.-техн. зб. наук. пр. (будівництво). – 2009. – Вип. 72. – С. 302-308.
6. Сторожук, Н. А. Вибровакуумирование бетонных смесей и свойства вакуумбетона [Текст] : монография / Н. А. Сторожук. – Д.: Пороги, 2008. – 251 с.

Поступила в редколлегию 23.02.2011.

Принята к печати 02.03.2011.