

$$R_y = \omega_i \nabla^2 v + \frac{1}{3} \omega_i \frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{4}{3} \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \omega_i}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (10)$$

Аналогично (9), (10) представляем в перемещениях и граничные условия

$$\begin{aligned} P_{N_x} + T_x &= \left( 2G \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \theta \right) l + G \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) m; \\ P_{N_y} + T_y &= G \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) l + \left( 2G \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \theta \right) m, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $l$ ,  $m$  – косинусы углов между соответствующими осями и нормалью к площадке;

$(P_{N_x} + T_x)$ ,  $(P_{N_y} + T_y)$  – поверхностные силы.

К уравнениям (10), (11) добавляем уравнение изгиба балки в контактной зоне

$$\frac{d^4 v_i}{dx^4} = - \frac{P_i - X_i}{EI_d} \quad (12)$$

где  $P_i$  – реактивные давления;

$X_i$  – внешние объемные силы (в зоне контакта  $X_i \rightarrow Y_i$ );

$EI_d$  – жесткость балки при изгибе.

Поставленную краевую задачу предполагается решать численно методом конечных разностей (МКР), то есть заменой дифференциальных уравнений конечно-разностными аппроксимациями. В настоящее время составляется программа на языке MATCAD для реализации указанного подхода.

УДК 629.735

### Шлаки Белорусского металлургического завода – сырьевой резерв производства дорожного асфальтобетона

Савченко Е.А., Бусел А.В.

Белорусский национальный технический университет

На Белорусском металлургическом заводе ежегодно вывозится в отвал 100 тыс. тонн в год. Запасы шлака в отвалах составляют более 800 тыс. тонн. Опыт применения сталеплавильных

шлаков в промышленности стройматериалов и стройиндустрии показал, что они являются существенным резервом экономии материальных и энергетических ресурсов. Наиболее широко используются доменные, мартеновские шлаки, меньше шлаки электросталеплавильного производства в составе асфальтобетона/1,2/.

Основными продуктами переработки шлаков за рубежом является шлаковый щебень (США - 85 % от объемов шлаков, Япония - 91 %, Великобритания - 77 %). Шлаки, обработанные органическими вяжущими материалами, широко применяются для устройства дорожных покрытий в США, Англии, Франции, Германии /3/. На металлургических предприятиях Австрии /4/ из сталеплавильных шлаков выпускают более 800 тыс. тонн щебня, 85 % которых используют для производства асфальтобетонных смесей, применяемых для устройства слоев износа дорожных одежд, работающих в условиях высокой интенсивности движения тяжелых автомобилей.

Непосредственное применение шлака в составе асфальтобетонных покрытий встречает трудности вследствие значительной неоднородности его структуры и химического состава.

С целью установления характера влияния щебня из шлака на основные технологические характеристики асфальтобетонной смеси были проведены исследования электросталеплавильных шлаков.

При рассмотрении электросталеплавильного шлака под микроскопом среди кристаллической фазы можно встретить отдельные мелкие включения прозрачного изотропного стекла.

Стекловидные частицы образуются при быстром и неравномерном охлаждении расплава шлака, они снижают прочностные свойства щебня. Структура электросталеплавильных шлаков сравнительно однородная, плотная, форма зерен дробленого шлака – кубовидная, лещадные и игольчатые частицы практически отсутствуют.

Методами рентгенофазового анализа (РФА), термического анализа (ДТА) и химического анализа в ИОНХ НАНБ исследованы образцы электросталеплавильных шлаков.

Термический анализ проводился на образцах шлаков отличающиеся друг от друга по времени их отбора. На кривых ДТА

наблюдались два эндотермических эффекта при температурах 100-130 °С и 850- 900 °С. Первые связаны с удалением адсорбционной воды, а вторые с разложением присутствующего в шлаках карбонатов кальция ( $\text{CaCO}_3$ ). Следует также отметить, что после удаления адсорбированной влаги наблюдалось уменьшение массы образцов вплоть до 400 °С, связанное, вероятно, с наличием гидросиликатов кальция. Уменьшение массы образцов шлаков, представленное на кривых ДТА, позволило определить влажность образцов (0,5-1,5 %) и содержание карбонатов кальция (2,0-3,9%).

На рентгенограммах наблюдались дифракционные отражения ортосиликтов кальция ( $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ - формы) и карбонаты кальция. В образце из шлака текущего производства обнаружена также фаза карбида  $\text{AlFe}_3\text{C}_x$  ( $\text{C}_x=4\%$ ). Кроме этого в шлаке определено содержание феррита магния ( $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ) и алюмината марганца ( $\text{MnAl}_2\text{O}_4$ ).

Фазовый состав электросталеплавильных шлаков представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Фазовый состав электросталеплавильных шлаков, %

Образцы / Фаза	№ 1 от 3.12.03	№ 2 от 14.11.03	№ 3 1998 год
$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ( $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ -)	80,6	86,5	85,4
$\text{MgFe}_2\text{O}_4$	7,8	6,2	6,8
$\text{MnAl}_2\text{O}_4$	4,2	3,8	3,2
$\text{CaCO}_3$	3,9	2,0	3,2
$\text{AlFe}_3\text{C}_x$	5,0	-	-
Влажность	0,5	1,5	1,4

Было установлено, что щебень, получаемый из электросталеплавильных шлаков обладает прочностью соответствующей марке М1000-М1200 по ГОСТ 3344-83, истираемостью – И1 и высокой морозостойкостью. По сравнению с гранитным щебнем из месторождения “Микашевичи” он отличается более высокой на 16,8-18,9% истинной и средней плотностью. Его насыпная плотность выше на 12-13%, а пустотность - на 5 – 6%. По причине пористой структуры его водопоглощение выше, чем у щебня из гранита в 15-25 раз. В сравнении с гранитным щебнем он

имеет более правильную форму зерен и развитую шероховатую поверхность.

Основные прочностные показатели асфальтобетонной смеси на основе щебня из электросталеплавильных шлаков представлены в таблице 2 (индексом «а» отмечены асфальтобетонные смеси на основе гранитного щебня).

Таблица 2 - Прочностные показатели свойств асфальтобетонов из горячих смесей

Наименование показателя	1	1а	2	2а	3	3а	Нормативное значение СТВ 1033
1.Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	2,59	2,46	2,5	2,48	2,53	2,49	Не нормируется
2.Водонасыщение по объему, %	1,3	1,1	0,1	1,1	1,4	1,0	1-4
3.Набухание, % по объему	0	0	0,1	0	0	0	<0,5
4. Предел прочности при сжатии, МПа при температуре 50 °С	1,4	1,6	1,3	1,4	1,5	1,7	>1,1
5.Предел прочности при сдвиге по ме-	4,0	3,1	4,6	4,2	3,3	2,9	>2,1

тодике ТУ г. Санкт- Петербур- га, МПа							
б.Коэф- фициент во- достойко- сти	0,83	0,75	0,78	0,68	0,86	0,82	0,80

(28суток)

Анализ полученных результатов свидетельствует, что асфальтобетонные смеси с использованием шлаковых материалов обладают повышенной сдвигоустойчивостью по сравнению с асфальтобетоном на гранитном щебне, что может быть обусловлено: 1) содержанием зерен лещадной формы в гранитном щебне около 30%, когда в шлаковом - менее 10%; 2) зерна шлаковых материалов имеют кубовидную форму с высокоразвитой шероховатой и угловатой поверхностью.

При испытании асфальтобетонных образцов на шлаковом щебне показатели длительной водостойкости выше, чем у образцов на основе гранитного щебня. Так, при взаимодействии, входящего в состав двухкальциевого силиката с водой, образуется гидросиликат кальция, который образует коллоидную массу, обладающую клеящими свойствами и способную затвердевать. В результате этого на поверхности гранул возникают гидратированные оболочки, а в местах контакта зерен шлака – кристаллизационные сростки. Так, при длительном водонасыщении часть пор в шлаковых зернах, к которым имеется доступ воды, армируются кристаллогидратами, придавая материалу большую прочность. Однако, гидросиликат кальция, увеличивается в объеме при контакте с водой и вызывает разрушение его частиц. Это может привести к нарушению структуры асфальтобетона и снижению его устойчивости к действию погодных-климатических факторов и транспортных нагрузок. Поэтому, применение электросталеплавильных шлаков текущего производства в составе асфальтобетона возможно, при условии обеспечения его устойчивой структуры.

## Литература

1. Гезенцвей Л.Б. Применение мартеновского шлака в дорожном асфальтобетоне. Канд. Дисс., 1958, с.175
2. Климашов Ф.С. Металлургические шлаки для дорожного строительства «Автомобильные дороги», 1963, №2, с.21-23
3. «Sculls» –Blast furnacl slag alos builders.– Реферативный журнал «Автомобильные дороги», 1970, №5, с.31
4. Применение металлургических шлаков в дорожном строительстве. Wissenspotential. «Sekundaer Rohstb», 1987,4, №10, с.20-23.

УДК 666.973

### **Аналитический метод расчета абсолютного объема материалов при проектировании состава ячеистых бетонов**

Дзабиева Л. Б., Новицкая М.С.

Белорусский национальный технический университет

Ячеистый бетон широко используется в современном строительстве как эффективный материал для производства теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных изделий: панелей и блоков наружных стен, внутренних перегородок, теплоизоляционных и акустических плит и т. д.

Вне зависимости от способа создания пористой структуры – пено- или газообразование – технологические параметры производства ячеистобетонных изделий назначаются в соответствии с инструкцией [1], она же определяет и методику проектирования состава ячеистобетонной смеси. В основу расчета положен метод абсолютных объемов, при котором объем ячеистого бетона представляется как сумма следующих слагаемых: объем, занимаемый сухими материалами; объем пор, формирующихся за счет испарения свободной (не вступившей в химическую реакцию образования гидросиликатов кальция) воды затворения; объем пор, сформированный за счет реакции газообразования или объем введенной пены.

Такой подход позволяет представить величину пористости  $P_p$ , которую должен создать в ячеистом бетоне порообразователь, чтобы, при принятых параметрах сырьевых материалов и