

ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

3.5. Направления применения золошлаков энергетических углей

3.5.2. Дорожное строительство

3.5.2.5. Системы вяжущих смешанного типа. Устойчивая альтернатива железобетонным дорожным покрытиям

И. Папайанни, Е. Анастасиу, М. Папахристофору, Университет Аристотеля в Салониках, Греция

АННОТАЦИЯ

Потенциал прочности альтернативных вяжущих, таких как: летучая зола, шлак, природные пуццоланы и метаклаин обычно не используется в максимальной степени, т.к. их физико-механические характеристики редко изучаются подробно. При условии, что существуют основательные знания в области характеристик добавок в цементные материалы, сочетание больших объемов этих добавок в системе вяжущих могли бы послужить устойчивой альтернативой традиционным составам. В данной статье приведены результаты исследований системы вяжущих, содержащей большое количество кальциевой летучей золы и природного пуццолана, и лишь 20% портландцемента по массе, которые использовались в основании дорожного покрытия части сельской дороги, построенной EGNATIA Одос SA в Греции. Приведены свойства бетонной смеси в свежем и затвердевшем состоянии, а также ее технические характеристики. Перечислены проблемы, возникающие при строительстве, а также результаты кратковременных и долговременных испытаний характеристик бетонного дорожного покрытия.

Ключевые слова: летучая зола, природные пуццоланы, портландцементный клинкер, системы вяжущих, железобетонные дорожные покрытия, сжатие, прочность

ВВЕДЕНИЕ

Системой вяжущих веществ смешанного типа обычно называется система, состоящая из порошковых материалов, в которой при добавлении воды появляются цементирующие свойства при нормальных условиях, и появляется прочность после усадки и затвердевания. Концепция использования потенциала систем вяжущих веществ смешанного типа хорошо известна в строительстве еще с исторических времен, где пуццолан добавляли в известь с целью повышения прочности и влагостойкости.

С 19-го века и до наших дней портландцемент преобладает в строительной отрасли, но под давлением в экономике и при необходимости соблюдения экологических требований, использование вяжущих смешанного типа существенно увеличивается, независимо от способа их введения в бетонную смесь - либо в форме многокомпонентных цементов, либо как сочетание отдельных ингредиентов, добавляемые непосредственно в смеситель периодического действия. Тем не менее, на мировом уровне только очень небольшой процент этих альтернативных материалов (около 10% от выхода каждого [1]) нахо-

дят полезное применение в строительстве, и потенциал их использования в будущем огромен.

Первый простой шаг на пути обеспечения социальной и экологической ответственности в строительстве состоит в том, чтобы производить местные побочные продукты промышленности, такие как летучая зола и шлак, которые могут полезно применяться в строительном секторе. Строительство дорожных покрытий является сектором, который может потреблять большие объемы вяжущих побочных продуктов для подоснов дорог, их оснований и даже верхних слоев бетонных конструкций. В частности, уплотненные катками бетонные дороги являются бетонными дорожными покрытиями, рекомендуемыми в качестве тяжелых или легких дорожных покрытий, проселочных дорог, торговых площадей и аэропортов. Это обусловлено, в основном, тем, что можно быстро положить дорожную одежду без опалубки и стальной арматуры. Железобетонные конструкции обеспечивают оптимальное решение с точки зрения затрат, прочностных свойств и долговечности. Кроме того, требуется обычный асфальтоукладчик для производства дорожных работ с минимальными затратами труда. Требуемая прочность, как правило, составляет 20...35 МПа с толщиной после уплотнения 20...25 см, однако, предпочтительно иметь один слой дорожной одежды во избежание рабочих швов. Использование летучей золы или шлака в железобетонных дорожных покрытиях давно используется во многих странах, таких как США, Австрия, Австралия; существует большое количество соответствующих технических руководств [2-4]. Тем не менее, для исследования нюансов, таких как варианты мощения дорог и вибрации, необходимо пилотное строительство дорог с использованием местных систем вяжущих материалов в региональных условиях окружающей среды. Таким образом, необходимо выполнение следующих этапов:

- развитие систем вяжущих веществ смешанного типа и оценка их качества;
- определение состава бетонной смеси для уплотнения катками;
- исследование свойств при проведении опытов в свежем и затвердевшем состояниях;
- пилотное строительство части дорожного покрытия;
- измерение долговременной прочности и морозо-

устойчивости.

СТРОИТЕЛЬСТВО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ДОРОГИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЯЖУЩИХ СИСТЕМ СМЕШАННОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ЗОЛЫ

Большой срок службы и низкая стоимость технического обслуживания - хорошо известные преимущества железобетона по сравнению с асфальтовыми покрытиями. Известно также снижение техногенной нагрузки в результате измерений по оценке жизненного цикла. Кроме того, железобетонные дорожные покрытия являются более прочными и устойчивыми при их эксплуатации тяжелыми грузовиками. Они рекомендованы к использованию при строительстве съездов на транспортных развязках и для проезда тяжелых грузовиков в условиях жаркого климата. К недостаткам бетонных дорог относятся шум из-за шероховатости поверхностного слоя, а также снижение комфорта при движении. Существует, конечно, возможность постелить еще один слой асфальта (4...5 см), но при этом увеличиваются тепловые выбросы, и уменьшается коэффициент отражения света. Первоначальная стоимость строительства бетонного дорожного покрытия немного выше, чем у асфальтового, однако, использование вяжущих материалов смешанного типа также способствуют снижению затрат.

Стратегия строительства железобетонного дорожного покрытия с использованием летучей золы в качестве вяжущих была разработана в рамках проекта TEFRODOS в 2011-2014 гг., который финансировался Генеральным секретарем в области исследований и технологий Греции. Партнерами проекта выступали цементный холдинг ТИТАН, Национальный технический университет в Афинах и Университет Аристотеля в Салониках в качестве координатора. Для строительства дороги, выполнялись этапы, представленные ниже.

• Разработка вяжущих смешанного типа и оценка качества

Как известно, кальциевая летучая зола составляет более 50% от общего производства летучей золы в Европе, а в Греции - это единственный вид летучей золы, производство которого составило 8 млн. тонн в 2013 г. Кальциевая летучая зола не подпадает под действие соответствующего стандарта по ее использованию, как в случае кремниевой золы [5], однако, согласно Европейскому стандарту по гидравлическим вяжущим в дорожных работах EN 13282 [6], можно разработать гидравлические вяжущие смешанного типа. Таким образом, началось систематическое изучение качества кальциевой летучей золы ТЭС Греции. Параметры, по которым проводилось исследование, - $\text{CaO}_{\text{своб}}$, SO_3 , потери при прокаливании и размер частиц. Было решено не проводить предварительного отбора проб летучей золы ТЭС Агиос Димитриос. Затем в холдинге ТИТАН были изготовлены различные смеси из четырех составляющих: летучей золы, клинкера, пуццолана и известково-каменного наполнителя. Для раз-

личных смесей были проведены измерения размеров частиц, времени помола, водопотребления, времени схватывания, объема стабильности по принципу Ле Шателье (расширение) и прочности на сжатие через 2, 7 и 28 дней.

Характеристики компонентов гидравлических вяжущих приведены в табл. 1. Окончательный состав вяжущих смешанного типа состоит из 50% кальциевой летучей золы, 25% клинкера, 12,5% природного пуццолана и 12 % известкового наполнителя, характеристики которого приведены в табл.2. Помол частиц для увеличения удельной поверхности по Блейну считался необходимым для достижения лабораторной прочности на сжатие через 28 дней, составляющей около 40 МПа, таким образом, чтобы при сжатии прочность на месте составляла не менее 30 МПа. Следовательно, водопотребление пасты нормальной консистенции, в которой летучая зола использовалась как гидравлическое вяжущее, составляло 41,5%, что считается высоким, однако, объемная стабильность было нормальной и при этом проблем не наблюдалось.

Таблица 1. Химический анализ и характеристики компонентов гидравлических вяжущих

Компонент	Цементный клинкер	Кальциевая летучая зола	Известковый наполнитель	Природный пуццолан
SiO_2 (%)	21.35	34.40	0.20	63.80
Al_2O_3 (%)	5.40	13.60	0.20	18.10
Fe_2O_3 (%)	3.40	6.10	0.05	4.10
CaO (%)	65.75	32.80	55.00	2.80
MgO (%)	1.60	3.80	0.60	1.00
$\text{CaO}_{\text{своб}}$ (%)	1.30	6.40	n/a	n/a
$\text{SiO}_2\text{-реакт.}$ (%)	n/a*	n/a	n/a	35.00
SO_3 (%)	1.20	6.78	0.00	0.00
П.п.п. (%)	0.00	3.26	44.10	3.20
Нерастворимый остаток (%)	0.00	23.80	0.00	82.80

*не измерялось

• Компонентный состав железобетона с использованием кальциевой летучей золы в качестве вяжущего и тестирование свойств в свежем и затвердевшем состояниях

Состав железобетона был обоснован рекомендациями в литературе, а также предшествующим опытом Лаборатории строительных материалов Университета Аристотеля в Салониках при исследовании использования кальциевой летучей золы при строительстве железобетонных дамб и дорожных покрытий [7]. Требуемая прочность составляла C25/30, а изготовление упрочненных смесей было основано на определении плотности по Вебе согласно предписаниям ACI 325.10R-95 и соответствующим стандартам.

Было выбрано две фракции молотого известкового наполнителя с максимальным размером зерен 16 и 31,5 мм, как показано на рис. 1. Плотность нового гидравлического вяжущего под названием "тефроцемент" колебалась от 270 до 300 кг/м³. В тех случаях, когда это было возможно, водоцементное

отношение составляло не более 0,50; также было добавлено разное количество суперпластификаторов. Было изготовлено два вида смесей: смеси А – с максимальной крупностью наполнителя - 16 мм и смеси В - с максимальным размером частиц наполнителя - 31,5 мм, как показано в табл. 3.

Таблица 2. Свойства гидравлических вяжущих смешанного типа

Физические свойства	
Удельная поверхность по Блейну (см ² /г)	9550
Крупность частиц (остаток на сите с размером ячейки 45 мкм)	0,4
Водопотребление (%)	41,5
Первоначальное время схватывания (мин)	210
Расширение по Ле Шателье (мм)	0,0
Прочность через 2 дня (МПа)	15,9
Прочность через 7 дней (МПа)	26,3
Прочность через 28 дней (МПа)	40,1
Химические свойства	
П.п.п. (%)	8,40
SO ₃ (%)	3,20
Нерастворимый остаток (%)	26,40
СаО _{своб} (%)	4,80
Результаты химического анализа	
SiO ₂ (%)	29,90
Al ₂ O ₃ (%)	12,65
Fe ₂ O ₃ (%)	3,80
СаО (%)	42,90
MgO (%)	2,20

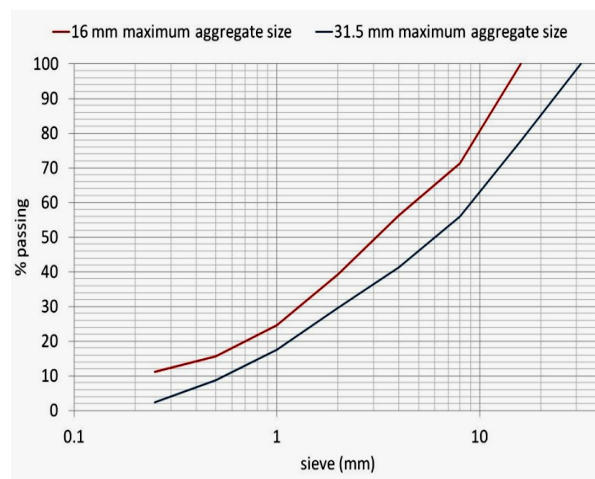


Рис 1. Группы фракций молотого известкового наполнителя с максимальным размером зерен - 16 и 31.5 мм. (passing – просеивание, sieve - размер ячейки сита)

В ходе подготовки пробных лабораторных смесей было отмечено, что их схватывание происходит относительно быстро, а время по Вебе следует измерять через некоторое время после их транспортировки с тем, чтобы со смесями можно было нормально работать на месте.

Таблица 3. Исследования лабораторных смесей А и В

Смесь	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
Плотность гидравлических вяжущих для дорожных работ (кг/м ³)	280	280	280	280	300	270	280	280
Водопотребление (кг/м ³)	153	153	196	163	120	135	150	148
Плотность мелких наполнителей (кг/м ³)	1096	1096	1096	1096	1096	1096	1096	1096
Плотность крупных наполнителей (кг/м ³)	897	897	897	897	897	897	897	897
Максимальный размер зерен наполнителей (мм)	16	16	16	16	31,5	31,5	31,5	31,5
Суперпластификаторы (% от вяжущего по массе)	0,0 %	1,0 %	1,0 %	0,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	0,5 %
Вода/цемент	0,54	0,54	0,70	0,58	0,40	0,50	0,54	0,53
Время по Вебе (с)	-	-	20	60	8	9	60	35
Плотность по Вебе (кг/м ³)	2427	2396	2428	2410	2396	-	2389	2404
Плотность при использовании электроمولота (кг/м ³)	2480	2355	2446	2447	-	-	2408	2478
Прочность на сжатие через 7 дней (МПа)	33,5	28,3	22,4	32,4	-	22,0	28,6	31,1
Прочность на сжатие через 28 дней (МПа)	43,8	35,7	30,9	46,0	35,4	35,3	37,5	42,3

Таким образом, время по Вебе измерялось при t=0' и t=30' после добавления воды в новые виды пробных смесей, для которых плотность по Вебе сравнивалась с величиной, полученной при уплот-

нении с использованием электрического молотка (табл. 4). Как видно из результатов табл.4, величины, полученные при применении двух различных методов измерения плотности, были сходными.

Таблица 4. Исследование новых лабораторных смесей А и В с учетом времени транспортирования

Смесь	A5	A6	B5	B6
Гидравлические вяжущие для дорожных работ (кг/м ³)	280	280	280	280
Водопотребление (кг/м ³)	148	148	159	148
Плотность мелких наполнителей (кг/м ³)	1096	1095,8	1095,8	1096
Плотность крупных наполнителей (кг/м ³)	912,6	912,6	629,2	629,2
Максимальный размер зерен (мм)	16	16	31,5	31,5
Суперпластификаторы (% от вяжущего по массе)	0,0	0,5	1,0	0,0
вода/цемент	0,53	0,53	0,57	0,53
Время по Вебе (с), t=0'	60	40	12	50
Время по Вебе (с), t=30'	100	80	30	80
Плотность по Вебе (кг/м ³), t=0'	2385	2313	2430	2447
Плотность по Вебе (кг/м ³), t=30'	2420	2410	2415	2400
Плотность при использовании электроمولота (кг/м ³), t=0'	2474	2505	2466	2490
Прочность на сжатие через 7 дней (МПа)	31,4	30,7	25,5	33,7
Прочность на сжатие через 28 дней (МПа)	45,6	43,4	37,9	49,3

- Пилотное строительство железобетонного дорожного покрытия с использованием кальциевой летучей золы в качестве вяжущего

В Греции есть небогатый опыт строительства дорожных покрытий из бетона. Для того, чтобы учесть все детали строительства железобетонного дорожного покрытия с помощью стандартного оборудования для укладки асфальта, было решено продолжить мелкомасштабное пилотное строительство дорожных покрытий (30÷100 м) при показателе $CBR \geq 18$, с использованием лабораторных бетонных смесей, в частности, смесей В4, В5 и В6. Завод по изготовлению бетонных смесей расположен в 30 минутах езды от места их укладки. Транспортирование смесей выполнялось в закрытых грузовиках, которые высыпали бетон в асфальтоукладчики (рис. 2). Очень скоро стало очевидно, что непрерывное поступление упрочненного золобетона в асфальтоукладчик имеет важное значение в связи с его быстрым схватыванием. Как показано на рис. 3, задержка поставки бетона привела к проблемам при выгрузке свежего бетона в асфальтоукладчик. Затем на месте с помощью датчика Гумбольдта было произведено измерение плотности дороги после уплотнения, которое осуществлялось асфальтоукладчиками и катками (рис. 4). Результаты измерений приведены в табл. 5.



Рис. 2. Разгрузка грузовиков в асфальтоукладчик и укладка железобетонного дорожного полотна



Рис. 3. Налипание свежего бетона на грузовик вследствие транспортной задержки

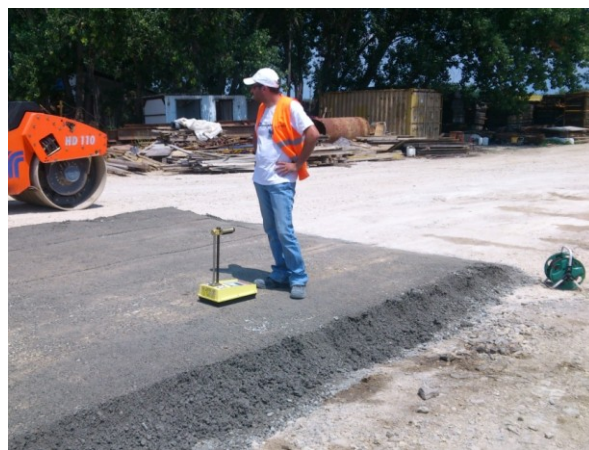


Рис. 4. Измерение плотности дорожного полотна геодезическим прибором

Таблица 5. Измерение плотности свежеложенного упрочненного золобетона датчиком плотности, % от измеренной плотности по Вебе

Глубина	Сразу после укладки	После уплотнения
5 см	81.8%	90.4%
10 см	81.2%	91.3%
15 см	81.0%	90.6%
20 см	79.7%	89.3%
Усредненная общая глубина полотна (см)	-	22.1

Также было обнаружено, что по эффективному варианту уплотнения нужно иметь 3 прохода 4-тонными невибрационными катками, а затем 2 прохода невибрационными и 2 прохода вибрационными 10-тонными катками (рис. 5). При использовавшемся асфальтоукладчике величина достигнутого уплотнения не превысила 80% от максимальной плотности бетона. Кроме того, максимальная толщина одного слоя после уплотнения не превышала 20 см. Разделка швов на глубину, соответствующую 1/4-1/3 толщины дороги, осуществлялась каждые 5,5-6,0 м после затвердевания дорожного полотна (рис. 6). Пленка для выдерживания бетона не использовалась; применялось небольшое распыление водой с тем, чтобы сохранить поверхность дорожного полотна в сухом состоянии.



Рис. 5. Уплотнение дорожного полотна катками



Рис. 6. Разделка стыков

• Измерение долговременной прочности

Через два месяца после строительства 1 км упрочненного золобетонного дорожного покрытия изъят внутренний слой путем бурения (рис. 7), и проведено исследование плотности бетона и выполнена оценка прочности. Результаты исследований приведены в табл. 6. Была также измерена морозостойкость изъятых внутренних слоев путем тестирования циклов замораживание-оттаивание с -25°C до $+20^{\circ}\text{C}$. После 50 циклов испытаний выяснилось, что в среднем потеря материала составила 8%, в то время как при испытании обычного бетона C20/25, который был использован в качестве референтного, средняя потеря материала составила 5%.



Рис. 7. Бурение отверстий

Таблица 6. Механические свойства внутренних слоев золобетона, изъятых из разных мест тестируемого дорожного полотна (в среднем, 6 образцов на испытываемую зону)

Зона строительства дороги	1	2	3
Скорость импульса u (м/с)	4625	5022	4713
Плотность ρ (кг/м ³)	2295	2394	2345
Прочность на сжатие f_c (МПа)	25,0	32,0	31,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кальциевая летучая зола использовалась без предварительного отбора вместе с цементным клинкером, природным пуццоланом и известняковым наполнителем для производства гидравлического вяжущего смешанного типа для строительства золобетонных дорожных покрытий в соответствии с EN 13282. Состав такого гидравлического вяжущего включал: 50% летучей золы, 25% клинкера, 12,5% природного пуццолана и 12,5% известнякового наполнителя. Достигнутая прочность через 28 дней составляла 20...30 МПа, что является достаточным для дорожного покрытия. Строительство дороги из железобетона с использованием вяжущего смешанного типа является практически осуществимым, а появляющиеся технические проблемы были должным образом решены.

Долговременная прочность и прочность дороги - достаточны, чтобы гарантировать длительный срок ее службы. Добавление дешевого промышленного продукта в состав гидравлических вяжущих способствовало существенному снижению начальной стоимости бетонной дороги, что делает эту экологичную альтернативу также и экономически эффективной.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. **Malhotra V. M.** (1999). "Making concrete" greener" with fly ash. Concrete International, 21(5).
2. **National Concrete Pavement Technology Center** (2010). "Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements". Iowa State University and Portland Cement Association, USA.
3. **ACI 325.10R-95 (2001)**. "State-of-the-art report on roller-compacted concrete pavements". ACI Manual of Concrete Practice, ACI, USA.
4. **PCA (2004)**. "Guide Specification for Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements". Portland Cement Association, Illinois, USA.
5. **Feuerborn H.-J., Müller B. and Walter E.** (2012). "Use of Calcareous Fly Ash in Germany". Proceedings of the International Conference Eurocoalash 2012, Thessaloniki, Greece, September 25-27, 2012.
6. **EN 13282-2 (2013)**. Hydraulic road binders – Part 2: Composition, specifications and conformity criteria of normal hardening hydraulic road binders. CEN.
7. **Papayianni I.** (2010). "Use of calcareous ash in civil engineering". Proceedings of the International Conference Eurocoalash 2010, Copenhagen, Denmark, May 27-28, 2010.

И. Папайяни, Е. Анастасиу, М. Папахристофору. Системы вяжущих смешанного типа. Устойчивая альтернатива железобетонным дорожным покрытиям // Материалы V конференции «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 24–25 апреля 2014 г. — М.: Полиграфический центр МЭИ, 2014. с. 71 – 75.