

УДК 691.542:678.046.3:625.7/8

**П. А. Лыщик**, кандидат технических наук, профессор (БГТУ);**Е. И. Бавбель**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);**А. И. Науменко**, магистр технических наук, аспирант (БГТУ)

### СОСТАВ МИНЕРАЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ГРУНТОВ

В статье приведены результаты исследований сырьевой смеси для получения портландцемента с минеральным наполнителем на основе золы-уноса для укрепления дорожных грунтов.

The article presents the results of research to produce the raw material mixture of Portland cement with mineral filler based on fly ash to strengthen road soils.

**Введение.** Автомобильный транспорт является важной составляющей технологии лесозаготовительного производства. Природно-климатические особенности лесной зоны требуют особого подхода при разработке ресурсосберегающих технологий для строительства лесных автомобильных дорог круглогодичного действия. Особенно актуальной является проблема использования в дорожном строительстве местных дорожных грунтов.

Для устройства конструктивных слоев дорожных одежд используются местные природные грунты, дробленые каменные материалы и отходы промышленных производств, укрепленные минеральными вяжущими. К таким вяжущим относятся различные цементы, известь, активные золы уноса, активные молотые гранулированные шлаки, фосфатные и другие вяжущие [1].

**Основная часть.** Для получения необходимой прочности лесных автомобильных дорог из местных грунтов требуется повышенный расход минеральных вяжущих. В целях совершенствования ресурсосберегающих и экономических технологий строительства лесных автомобильных дорог актуальной задачей является использование отходов промышленных производств для создания конструкций на основе грунтов, укрепленных композиционным вяжущим.

Так, для расширения сырьевой базы вяжущих материалов предлагается использовать комплексное минеральное вяжущее на основе портландцемента с микронаполнителем. В качестве наполнителя рекомендуется использовать золу-унос топок кипящего слоя Ошмянской ТЭЦ. Количество данных отходов в отопительный сезон на этом предприятии составляет около 200 т ежегодно.

В сырьевой смеси используется зола-унос от топок кипящего слоя, которыми в последнее время оборудуются котельные установки, работающие на местном топливе, в частности на фрезерном топливе. В таких топках сжигается фрезерный торф с высокой влажностью (до 65%) и зольностью (до 35%) в кипящем слое

кварцевого песка. Кипящий слой из кварцевого песка фракцией 0,4–1,6 мм, содержащий около 2% торфа, поддерживается воздухораспределительной решеткой, через которую подводится первичный воздух.

Технология сжигания осуществляется таким образом, что подовая зола вместе с кварцевым песком подвергается циклонной сепарации, после которой крупная фракция песка и золы возвращается в топку, а мелкая объединяется с золой уноса и выделяется хвостовой циклонной системой очистки дымовых газов. Средняя температура горения в топке не превышает 800°C. Уловленная зола-унос представляет собой сухой темно-серый порошок с высокой дисперсностью (не имеющая остатка на сите с сеткой № 008), со средней удельной поверхностью 2850 см<sup>2</sup>/г, средней плотностью 2650 кг/м<sup>3</sup>, насыпной плотностью 650–720 кг/м<sup>3</sup>.

Размер частиц золы-уноса не превышает 50 мкм. В ней установлено присутствие частиц четырех видов: мелкие (зерна размером менее 5 мкм); шаровидной формы с размером 10–20 мкм; неправильной формы (многогранники, частицы овальной формы со средним размером 10–40 мкм) и агрегированные ноздреватые размером до 50 мкм, а также частицы черного цвета, относящиеся к коксовому остатку торфа (рис. 1, 2).

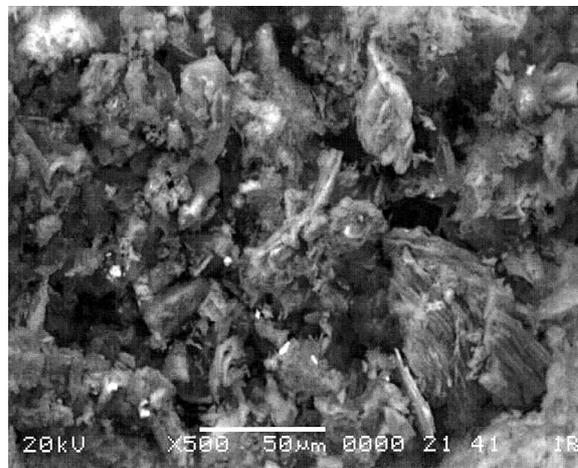


Рис. 1. Чистая торфяная зола

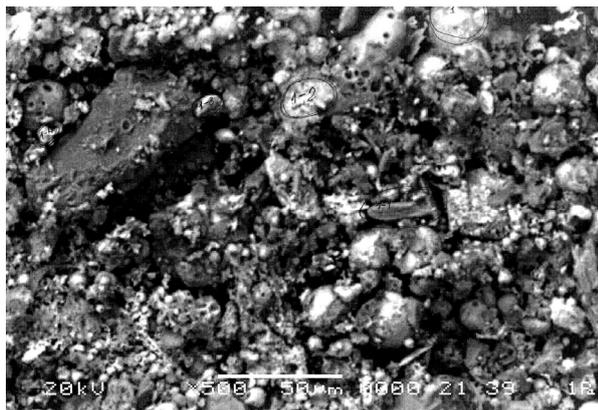


Рис. 2. Зола-унос

Содержание коксового остатка не превышает 2%. Фракционный состав золы уноса, мас. %: 0,1–0,2 мкм – 2; 0,6–1,2 мкм – 3; 3,5–12 мкм – 35 и 12–48 мкм – 60. Доля частиц в виде сфер не превышает 7%, частиц овальной формы – 2,5% (рис. 3).

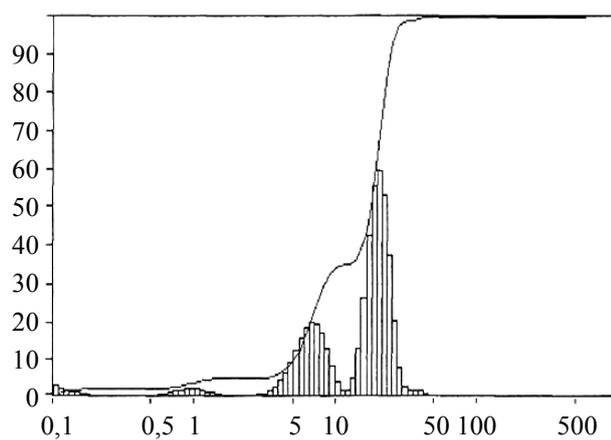


Рис. 3. Распределение зернового состава зольного остатка

Модуль основности золы-уноса, рассчитанный по данным ее химического состава, равен 1,02, модуль активности – 0,18. Химический состав и физико-химические свойства золы-уноса показывают, что она относится к малоактивному наполнителю и отвечает требованиям ГОСТ 25818–91 [2] и ГОСТ 25592–91 [3] в отношении использования ее в добавочных цементах, применяемых для приготовления различных видов бетонов и строительных растворов.

Минеральный состав золы-уноса представлен кристаллическими соединениями в виде  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $SiO_2$ ,  $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ ,  $FeO$ ,  $2CaO \cdot Al_2O_3$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $CaSO_4$ . Присутствуют также карбонаты магния и кальция. Соотношение высокодисперсных частиц песка и золы торфа в золе-уносе по массе равно 1 : 2. Усредненный химический состав компонентов сырьевой смеси приведен в табл. 1.

Таблица 1

### Усредненный химический состав компонентов сырьевой смеси

Оксиды	Содержание, мас. %		
	Зола-унос	Портландцементный клинкер	Двуводный гипс
C	1,96	–	–
CaO	28,29	64,25	32,38
SiO <sub>2</sub>	23,94	23,16	3,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,40	4,29	0,82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	4,51	0,31
FeO	30,47	–	–
MgO	0,56	0,58	2,03
Na <sub>2</sub> O	0,28	0,98	–
K <sub>2</sub> O	0,99	0,66	–
SO <sub>3</sub>	0,84	0,92	41,70
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,31	–	–
Cl	0,18	–	–
CO <sub>2</sub>	3,90	–	–
H <sub>2</sub> O кристаллогидратная и химически связанная	1,98	–	19,25
Процент потерь при прокаливании	8,91	0,65	–

Количество вводимой в состав сырьевой смеси для получения портландцемента с минеральным наполнителем золы-уноса принималось от 10% до 75%. Данного количества необходимо и достаточно для получения цементов самых распространенных марок 500, 400, 300, 200. При введении в состав сырьевой смеси золы-уноса менее 20% марка портландцемента не превышает 500, при введении ее более 70% она становится ниже 200. Введение в сырьевую смесь двуводного гипса в количестве 1% является достаточным для достижения требуемых сроков начала и конца схватывания цементного теста.

Для изучения вяжущих свойств полученных смесей готовили на их основе цементные растворы в соотношении песок – сухая смесь 3 : 1. Водоцементное отношение принимали одинаковым для всех смесей – 0,38. Готовили по двенадцать кубиков каждого состава. Твердение их проводили по режиму: первые сутки в формах на воздухе, затем после распалубки в воде. Через 3, 7, 28 сут кубики извлекались из воды и испытывались на прочность при сжатии [4].

Исходя из результатов экспериментальных исследований предложен следующий состав сырьевой смеси для получения портландцемента с минеральным наполнителем, мас. %:

портландцементный клинкер	29–79
зола-унос топок кипящего слоя	20–70
двуводный гипс	1

Таблица 2

**Составы сырьевых смесей для получения портландцемента с минеральным наполнителем зола-унос топок кипящего слоя и физико-механические свойства цементов**

№ состава смеси	Содержание компонентов, мас. %			Предел прочности, МПа, в возрасте					
	зола-унос	двуводный гипс	портландцементный клинкер	3 сут		7 сут		28 сут	
				изгиб	сжатие	изгиб	сжатие	изгиб	сжатие
1	10,0	1	89,0	3,30	15,5	3,82	22,3	6,45	49,0
2	20,0	1	79,0	3,25	14,5	3,76	20,1	6,45	47,5
3	30,0	1	69,0	3,20	14,0	3,75	19,2	6,14	37,7
4	40,0	1	59,0	3,06	13,5	3,60	18,4	5,47	32,8
5	50,0	1	49,0	2,80	13,2	3,55	18,0	4,78	27,3
6	60,0	1	39,0	2,67	11,9	3,60	17,1	4,21	22,4
7	70,0	1	29,0	2,55	10,5	3,71	16,4	3,70	18,3
8	75,0	1	24,0	1,65	7,2	3,32	14,7	3,58	16,4

Зола-унос топок кипящего слоя с удельной поверхностью более 2850 г/см<sup>2</sup> (отсутствует остаток на сите с сеткой № 008) является микронаполнителем портландцемента. Ее частицы выполняют роль затравок кристаллизации гелеобразных продуктов гидратации минералов портландцементного клинкера.

Являясь малоактивными, они увеличивают длительность индукционного периода, связанного с растворением частиц клинкера и образованием насыщенных растворов, и отодвигают время начала схватывания цемента.

Однако в дальнейшем процесс кристаллизации гидратных фаз интенсифицируется. Частицы золы-уноса принимают участие в формировании структуры цементного камня: на их поверхности выделяются гидратные новообра-

зования высокой степени дисперсности. Происходит взаимодействие микронаполнителей с алюминатными составляющими портландцементного клинкера.

Примеры составов сырьевых смесей для получения портландцемента с минеральным наполнителем, результаты испытаний физико-механических свойств цементов приведены в табл. 2. По данным табл. 2 построены графики кинетики твердения образцов, которые показаны на рис. 4.

Как видно по данным табл. 2, полученные с золой уноса цементы обладают низкими темпами набора прочности в начальные сроки твердения и высокими после 14 сут твердения, а портландцемент марки 200 превышает показатели песчаного цемента по прочностным свойствам.

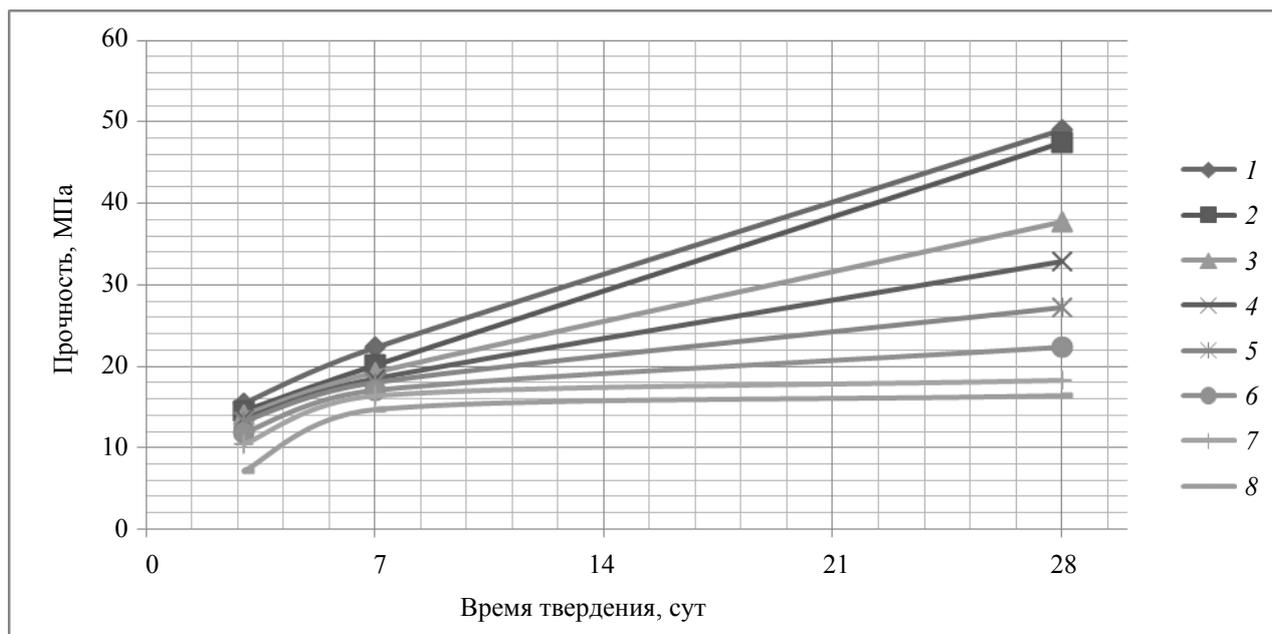


Рис. 4. Кинетика твердения сырьевой смеси портландцемента с микронаполнителем:  
 1 – ПЦ + 10% золы-уноса; 2 – ПЦ + 20% золы-уноса; 3 – ПЦ + 30% золы-уноса; 4 – ПЦ + 40% золы-уноса;  
 5 – ПЦ + 50% золы-уноса; 6 – ПЦ + 60% золы-уноса; 7 – ПЦ + 70% золы-уноса; 8 – ПЦ + 75% золы-уноса

Предлагаемая в качестве минерального наполнителя портландцемента зола-унос топок кипящего слоя, работающих на фрезерном торфе, в указанных пределах позволяет получить добавочный портландцемент марок: 500 – при содержании золы-уноса в портландцементе не более 15–20%; 400 – при содержании золы-уноса в портландцементе 30%; 300 – при содержании золы-уноса в портландцементе 40–50% и 200 при содержании золы-уноса в портландцементе 60–70%.

**Заключение.** Технический результат, достигаемый при использовании предлагаемой сырьевой смеси для получения портландцемента с минеральным наполнителем, заключается в снижении энергозатрат и себестоимости цемента при сохранении его основных строительно-технических свойств, расширении сырьевой базы за счет утилизации отходов. Замена кварцевого песка, требующего сушки и тонкого помола, на сухую высокодисперсную золу-унос топок кипящего слоя, содержащую высокодисперсные частицы песка и золы в соотношении примерно 1 : 2, позволяет достигнуть существенного снижения энергозатрат на процесс получения цемента.

Так, расход топлива на сушку одной тонны песка со средней карьерной влажностью 10% составляет около 20 кг условного топлива (кг у. т.) и примерно 45 кВт·ч электроэнергии на помол. При использовании указанных величин общее снижение энергозатрат при получении одной тонны цемента, содержащих минеральный наполнитель золу-унос вместо высушенного тонкомолотого кварцевого песка, составит: для цемента марки 500 – 5 кг у. т., марки 400 – 7,5 кг у. т., марки 300 – 10–12,5 кг у. т., для цемента марки 200 – 15–17,5 кг у. т.

При цене в настоящее время одной тонны условного топлива 750 тыс. руб. снижение се-

бестоимости портландцемента с минеральным наполнителем – золой-уносом по сравнению с песчаным цементом для марки 500 составит 3750 руб./т, марки 400 – 5625 руб./т, марки 300 – 7500–9375 руб./т, для марки 200 – 11 250–13 125 руб./т. Кроме того, использование золы-уноса в качестве минерального наполнителя в портландцемент позволяет расширить сырьевую базу для цементного производства и решить проблему утилизации неиспользуемого отхода малой энергетики в Республике Беларусь.

По строительно-техническим свойствам полученные цементы удовлетворяют требованиям ВСН 185-75 «Технические указания по использованию зол уноса и золошлаковых смесей от сжигания различных видов топлива для сооружения земляного полотна и устройства дорожных оснований и покрытий автомобильных дорог».

Состав вяжущего может быть использован на цементных заводах, в строительных организациях и в организациях, занимающихся приготовлением грунтобетонов при устройстве оснований автомобильных дорог.

#### Литература

1. Дорожные одежды с основаниями из укрепленных материалов / Ю. М. Васильев [и др.]; под общ. ред. Ю. М. Васильева. М.: Транспорт, 1989. 191 с.
2. Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов: ГОСТ 25818–91. Введ. 01.07.91. М., 1991. 11 с.
3. Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов: ГОСТ 25592–91. Введ. 04.07.91. М., 1991. 11 с.
4. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности: ГОСТ 22733–2002. Введ. 01.01.06. Минск, 2006. 20 с.

*Поступила 25.02.2014*