

ШЛАКОЩЕЛОЧНЫЕ ВЯЖУЩИЕ НА ОСНОВЕ МЕСТНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ДОРОГ НИЗКИХ КАТЕГОРИЙ

SLAG-ALKALINE BINDERS BASED ON DOMESTIC RAW MATERIALS USED FOR STRENGTHENING OF SURFACES OF LOW-CATEGORY ROADS

Г. А. Бурак, кандидат технических наук, доцент Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

А. А. Меженцев, кандидат технических наук, доцент Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

Я. Н. Ковалев, доктор технических наук, профессор Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

В. Н. Яглов, доктор химических наук, профессор Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

В статье изложены результаты изучения свойств композитов, полученных с использованием ваграночных шлаков Минского завода отопительного оборудования, жидкого стекла, полученного с использованием кремнегеля Гомельского химического завода, и песчано-гравийных смесей.

The article deals with the study results of properties of composites obtained using cupola slag of Minsk plant of heating equipment, liquid glass obtained from silica gel of Gomel chemical plant and sand gravels.

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве широкое применение получили вяжущие из доменных гранулированных шлаков, активированных цементным клинкером, гипсом и известью. По величине активности и другим свойствам такие вяжущие уступают портландцементу, однако их существенным преимуществом является относительная простота производства и наличие сырьевой базы.

Теоретическому и экспериментальному исследованию таких вяжущих посвящено значительное число работ. На основании этих исследований можно сделать вывод о том, что свойства шлаковых вяжущих в значительной мере определяются химическим составом шлаков. Состав шлаков, пригодных для производства цемента, регламентируется ГОСТ 3476 [1].

Активация шлаков может осуществляться также едкими щелочами или смесью солей щелочных металлов с известью. Однако установление этого факта не привело к разработке вяжущих, способных по величине активности конкурировать с традиционными вяжущими. Это, прежде всего, объясняется небольшим количеством ще-

лочного компонента, применяемого для активации шлаков, в результате чего роль щелочи ограничивалась простым возбуждением шлакового стекла.

Шлакощелочные вяжущие, разработанные В. Д. Глуховским [2], и исследованные в ПНИЛГ КИСИ, а также сотрудниками других организаций, занимающихся исследованием и внедрением этого материала, отличаются от них более высоким содержанием щелочного компонента, а также тем, что гипс, известь и клинкер в их состав совершенно не вводятся.

Шлакощелочные вяжущие – это двухкомпонентные вяжущие, состоящие из 90 %–95 % шлака и 5 %–10 % щелочного компонента. В качестве щелочного компонента используются, как правило, водные растворы (Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 , NaOH , K_2CO_3 , КОН).

Щелочные соединения в таких вяжущих не только активируют шлаковое стекло, но и служат активным структурообразующим компонентом.

Активность шлакощелочных вяжущих определяется природой щелочного компонента и его расходом. Новообразования в них представлены низкоосновными гидросиликатами кальция,



щелочными гидроалюмосиликатами и твердыми кристаллическими растворами щелочных и щелочноземельных алюмосиликатов.

Композиты на шлакощелочных вяжущих характеризуются высокой морозостойкостью, водонепроницаемостью, коррозионной стойкостью и обладают прочностью от 20,0 до 100,0 МПа. В таких композитах без ухудшения свойств могут быть использованы заполнители с повышенным содержанием пылеватых и глинистых частиц без ухудшения их свойств. Композиты на шлакощелочных вяжущих получили производственное внедрение и показали высокие эксплуатационные свойства.

Следует отметить, что исследование и внедрение в производство шлакощелочных вяжущих и материалов на их основе производилось преимущественно с использованием высокоосновных шлаков. Вопросы, связанные с использованием нейтральных и кислых шлаков для этих целей, несмотря на значительный объем их производства, до настоящего времени детально не изучены.

В связи с этим задачами настоящей работы являются:

- изучение основных физико-механических свойств шлакощелочных вяжущих из кислых шлаков;

- установление возможности расширения сырьевой базы шлакощелочных вяжущих за счет использования техногенных отходов Республики Беларусь;

- разработка составов, определение физико-механических и эксплуатационных свойств композитов на шлакощелочных вяжущих и местных материалах.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ И ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

С целью оценки возможности и целесообразности применения шлакощелочных вяжущих для укрепления грунтов при устройстве монолитных покрытий дорог низких категорий выполнены исследования свойств образцов, изготовленных из композитов, состоящих из песка или песчано-гравийных смесей и шлакощелочных вяжущих.

При проведении исследований в качестве заполнителей в композитах применяли:

- кварцево-полевошпатовый песок карьера «Волма»;

- песчано-гравийную смесь (ПГС) (таблица 1).

Анализ показал, что:

- содержание глинистых частиц в песчано-гравийной смеси – 1,5 %;

- содержание пылеватых и глинистых частиц в песке – 1,2 %;

- модуль крупности песка карьера «Волма» – 2,2.

В качестве шлакового компонента вяжущего использовали:

- молотый шлак ОАО «Минский завод отопительного оборудования» с удельной поверхностью, равной 2050, 3100 и 3900 см²/г. Петрографические исследования показали, что в составе шлака содержится 88 %–90 % стекловидной фазы, показатель преломления которой находится в пределах 1,63–1,64. Микроструктура гранулированного шлака характеризуется пористой пемзовидной структурой с перегородкой между порами из черного стекла. Модуль основности шлака – 0,5–0,7.

В качестве вяжущего для сравнения использовали портландцемент ПЦ500-ДО ОАО «Красносельцемент» со следующими показателями свойств:

- нормальная плотность цементного теста	26,5 %;
- начало схватывания	3,0 ч;
- конец схватывания	4 ч 30 мин;
- истинная плотность	3,16 г/см ³ ;
- тонкость помола по остатку на сите № 008	1,2 %;
- активность по способу ЦНИПС-2	34,0 МПа.

В качестве жидкости затворения использовали растворы жидкого стекла с силикатными модулями 1; 1,5; 2 и плотностью раствора, равной 1,2 г/см³. Жидкие стекла получали из кремнегеля (отхода Гомельского химического завода) и гидроксида натрия (NaOH) (квалификации «технический» – таблица 2). Кремнегель раство-

Таблица 1 – Гранулометрический состав заполнителей

Размеры отверстий сит, мм	Частные остатки на ситах, %	
	ПГС	Песок
5	13,0	0,0
2,5	17,0	7,5
1,25	15,0	9,5
0,63	18,0	23,0
0,315	20,2	21,5
0,14	13,5	35,5
менее 0,14	3,3	3,0
	100	100

Таблица 2 – Составы растворов жидкого стекла

Количество исходных веществ, г			Температура синтеза	Силикатный модуль (M ₀)
Кремнегель	NaOH	H ₂ O		
630	1000	3000	80	1,0
940	1000	3000	80	1,5
1300	1000	3000	80	2,0



ряли в нагретом растворе NaOH. Примеси в виде нерастворимого остатка отделяли от раствора.

Жидкие стекла указанных силикатных модулей получали также из трепела месторождения «Стальное» Могилевской обл. и технической щелочи.

Для создания щелочной среды использовали также технический NaOH, который вводили в воду затворения.

Автоклавирование образцов вяжущих проводили в автоклавах Минского комбината силикатных изделий по режиму 4–8–4 при 8 атм.

Свойства шлакощелочных вяжущих представлены в таблице 3.

Лучшими прочностными свойствами обладают составы 2, 3 и 4.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ

Образцы композитов, полученных с использованием в качестве заполнителя песчано-гравийной смеси, готовили в виде балочек (4×4×16 см),

твердение которых проходило в нормальных условиях по ГОСТ 10180 [3].

Формование образцов композитов с песчаным заполнителем проводили в малом приборе стандартного уплотнения СоюздорНИИ. При этом укрепленную смесь затворяли жидким стеклом в количествах, обеспечивающих достижение оптимальной влажности ($W_{\text{опт}}$) и максимальной плотности композита (δ_{max}). Испытания образцов выполняли в соответствии с требованиями ГОСТ 23558 [4]. При этом показатели прочности образцов определяли после предварительного водонасыщения образцов в течение 48 ч при полном погружении в воду. Составы и характеристики приготовленных композитов приведены в таблице 4.

Установлено, что с увеличением в составе смеси содержания вяжущего, полученного на основе шлака М300, наблюдается увеличение ее оптимальной влажности ($W_{\text{опт}}$) с 8,0 % до 9,0 % и соответственно δ_{max} с 2,04 до 2,07 г/см³.

Составы и свойства композитов на основе песчано-гравийных смесей и шлакощелочных

Таблица 3 – Свойства шлакощелочных вяжущих, полученных на основе ваграночного шлака Минского завода отопительного оборудования ($M_o = 0,5–0,7$)

№ состава	Состав вяжущего		Раствор (ЩК)	Сроки схватывания, ч		Предел прочности, МПа			
						Нормальное твердение		Автоклавирование	
	Шлак	Щелочной компонент (ЩК)	Шлак	Начало	Конец	$R_{\text{сж}}$	$R_{\text{изг}}$	$R_{\text{сж}}$	$R_{\text{изг}}$
1	$S = 3100 \text{ см}^2/\text{г}$	Жидкое ст. $M_c = 1,$ $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$	0,35	5,2	8,3	19,1	4,0	15,2	3,6
2	$S = 3100 \text{ см}^2/\text{г}$	То же	0,45	3,0	7,0	40,0	6,3	38,3	6,4
3	$S = 3900 \text{ см}^2/\text{г}$	То же	0,47	2,5	6,0	42,0	6,7	39,0	6,8
4	$S = 3100 \text{ см}^2/\text{г}$	NaOH 5,5 % от массы шлака	0,30	3,1	7,2	36,0	6,3	35,1	6,0
5	$S = 3100 \text{ см}^2/\text{г}$	Жидкое стекло $M_c = 1,5$ $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$	0,43	2,3	5,4	15,0	3,3	10,5	5,0
6	$S = 3100 \text{ см}^2/\text{г}$	Жидкое стекло $M_c = 2$ $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$	0,40	2,2	4,5	24,0	4,9	18,8	3,6

Таблица 4 – Составы композитов и показатели их свойств при уплотнении

№ состава композита	Состав вяжущего		Содержание песка, % массы композита	$W_{\text{опт}}$, %	δ_{max} , г/см ³
	Наименование	% массы композита			
1	ПЦ500-ДО	10	90	8,0	2,06
2	Молотый шлак Минского завода отопительного оборудования и жидкое стекло, состав № 1 (таблица 3)	10	90	8,0	2,04
3		15	85	8,5	2,05
4		20	80	9,0	2,07



вяжущих, полученных из шлака Минского завода отопительного оборудования и раствора жидкого стекла ($M_c = 2$ и $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$) представлены в таблице 5. Из приведенных данных следует, что при увеличении содержания шлака в композиционном материале с 20 % до 40 % мас. и снижении отношения раствора жидкого стекла к шлаку с 0,52 до 0,25 предел прочности при сжатии в 28-суточном возрасте увеличивается с 12,0 до 15,0 МПа, а предел прочности при изгибе изменяется очень мало и находится в пределах 3–4 МПа. Образцы обладают относительно низкой морозостойкостью. Коэффициент деформативности колеблется в пределах 0,24–0,28. Наилучшими прочностными свойствами обладает состав 4 (таблица 5). Однако следует отметить, что при более длительной выдержке композита, возможно, нарастание прочности будет продолжаться.

В таблице 6 приведены составы и свойства композитов на основе песчано-гравийных смесей и шлакощелочных вяжущих, полученных из шлака Минского завода отопительного обо-

рудования и раствора жидкого стекла ($M_c = 1,5$ и $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$). Из приведенных данных следует, что прочностные характеристики ($R_{ск}$ и $R_{изг}$) образцов хуже, чем при использовании в качестве жидкости затворения раствора жидкого стекла с $M_c = 2$ и $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$. Морозостойкость образцов невысока, такая же как для составов 1–3 (таблица 5). Характер изменения прочности во времени свидетельствует о возможности увеличения ее при более длительной выдержке образцов.

Наиболее высокие прочностные показатели получены для композиций на основе песчано-гравийных смесей и шлакощелочного вяжущего, полученного из шлака Минского завода отопительного оборудования и раствора жидкого стекла ($M_c = 1$ и $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$) (таблица 7). Высокие показатели по прочности получены в возрасте образцов 14 и 28 суток. При содержании 20 % мас. шлака и при отношении раствора жидкого стекла, равном 0,6, предел прочности при сжатии и изгибе образцов в возрасте 28 суток составляет, соответственно, 27,7 МПа и 4,83 МПа при коэффициенте мороз-

Таблица 5 – Составы и свойства композитов, полученных на основе ПГС и шлакощелочных вяжущих (шлак МЗОО). Модуль жидкого стекла – 2, $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$

Номер состава	Содержание, %		Раствор жидк. стекла Шлак	Прочность, МПа, через сут				Коэффициент деформативности		Коэфф. морозостойкости F^{15}
	Шлак	ПГС		3	7	14	28	K^{14}	K^{28}	
1	20	80	0,52	3,9	5,1	$\frac{8,3}{1,57}$	$\frac{12,0}{3,19}$	0,19	0,26	0,57
2	25	75	0,43	4,1	5,6	$\frac{8,7}{1,65}$	$\frac{13,6}{3,26}$	0,19	0,24	0,63
3	33	67	0,33	4,4	5,8	$\frac{9,1}{1,91}$	$\frac{14,7}{4,07}$	0,21	0,28	0,68
4	40	60	0,25	5,1	7,3	$\frac{10,3}{2,06}$	$\frac{15,5}{4,19}$	0,20	0,27	1,02

Примечание – Прочность: в числителе $R_{ск}$; в знаменателе $R_{изг}$.

Таблица 6 – Составы и свойства композитов, полученных на основе ПГС и шлакощелочных вяжущих (шлак МЗОО). Модуль жидкого стекла – 1,5; $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$

Номер состава	Содержание, %		Раствор жидк. стекла Шлак	Прочность, МПа, через сут				Коэффициент деформативности K^{28}	Коэфф. морозостойкости F^{15}
	Шлак	ПГС		3	7	14	28		
1	10	60	0,46	2,5	3,9	5,5	$\frac{9,15}{2,01}$	0,22	0,40
2	25	75	0,46	2,9	4,0	5,9	$\frac{9,45}{2,89}$	0,31	0,63
3	33	67	0,39	3,3	4,5	6,4	$\frac{10,2}{3,03}$	0,30	0,70

Примечание – Прочность: в числителе $R_{ск}$; в знаменателе $R_{изг}$.



зостойкости F^{25} , равном 1,02, и коэффициенте деформативности 0,17. Увеличение количества шлака в композите до 33 % мас. приводит к существенному увеличению пределов прочности при изгибе и сжатии (7,70 МПа и 46,0 МПа соответственно).

В составе 4 (таблица 7) в качестве жидкости затворения использован раствор жидкого стекла, полученного из NaOH техн. и трепела месторождения «Стальное» Могилевской обл. Прочностные показатели образцов этого состава практически не отличаются от аналогичного состава 2 (таблица 7), полученного с использованием в качестве жидкости затворения раствора жидкого стекла на основе кремнегеля и NaOH техн.

Изменения предела прочности при сжатии образцов (таблица 7) свидетельствуют о том, что при более длительной выдержке композиционного материала прочность его будет повышаться.

Изучение свойств композитов, полученных на основе песка и шлакощелочных вяжущих, показало, что прочность образцов, полученных на вяжущем, изготовленном на основе жидкого стекла и молотого шлака БЗО, изменяется во времени аналогично образцам, полученным на цементе.

Дополнительные исследования показали, что прочность образца композита, содержащего 20 % шлака и 80 % мас. песка, в возрасте 28 суток превышает прочность образца на цементном вяжущем. Это свидетельствует о том, что при более продолжительной выдержке прочность таких образцов может существенно превысить прочность образца сравнения. Водопоглощение образцов этого состава в возрасте

28 суток ниже, чем у образца сравнения, а коэффициент морозостойкости несколько ниже, чем у образца на цементном вяжущем.

При укреплении грунтов шлакощелочными вяжущими происходят сложные химические и физико-химические взаимодействия не только между раствором жидкого стекла и шлаком, но и жидкого стекла и тонкодисперсной частью грунта. Поэтому в качестве заполнителей возможно применение мелких песков, супесей, песчано-гравийных смесей, а также песков искусственного происхождения – отсевов камнедробления. Причем в шлакощелочных композиционных материалах возможно применение заполнителей, содержащих до 20 % мас. глинистых и пылевидных частиц [5, 6].

Синтез вяжущих в этом случае происходит непосредственно в породе за счет ее собственных ресурсов, извлекаемых из минеральных составляющих грунта в условиях сильнощелочной среды.

К особенностям шлакощелочных композитов относится значительное влияние расхода шлака на прочностные показатели шлакощелочного бетона при использовании раствора жидкого стекла одной плотности, но различных силикатных модулей. Наибольшие значения прочности получены при использовании в качестве жидкости затворения раствора жидкого стекла с силикатным модулем, равным единице, и плотностью 1,2 г/см³.

Высокие значения прочности композитов, полученных при использовании кислого шлака Минского завода отопительного оборудования, обусловлены также относительно высоким значением его удельной поверхности (порядка 3000 см²/г).

Таблица 7 – Составы и свойства композитов, полученных на основе ПГС и шлакощелочных вяжущих (шлак МЗО). Модуль жидкого стекла – 1,0; $\rho = 1,2$ г/см³

Номер состава	Содержание, %		Раствор жидк. стекла Шлак	Прочность, МПа, через сут				Коэффициент деформативности		Коэффициент морозостойкости F^{25}
	Шлак	ПГС		3	7	14	28	K^{14}	K^{28}	
1	20	80	0,60	6,1	9,2	$\frac{19,0}{2,85}$	$\frac{27,7}{4,83}$	0,15	0,17	1,02
2	25	75	0,54	7,2	13,7	$\frac{23,0}{3,45}$	$\frac{39,6}{6,51}$	0,15	0,16	1,03
3	33	67	0,42	9,3	15,4	$\frac{26,1}{4,18}$	$\frac{46,0}{7,70}$	0,16	0,17	1,05
4*	25	75	0,50	7,0	12,3	$\frac{22,1}{3,32}$	$\frac{35,7}{6,12}$	0,15	0,17	1,03

Примечание – 4* – жидкое стекло получено из трепела месторождения «Стальное» и NaOH техн.
Прочность: в числителе $R_{см}$; в знаменателе $R_{изг}$.



Оптимальное содержание щелочи в растворе жидкого стекла в композиционных материалах, обладающих достаточно высокой прочностью и морозостойкостью, должно составлять 5 %–7 % мас. в пересчете на Na_2O от массы шлака.

Время от момента приготовления композита до окончания его уплотнения на месте укладки должно быть минимальным и не должно превышать время начала схватывания композиционного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы композиты, включающие песчано-гравийную смесь и шлакощелочные вяжущие, полученные на основе шлака Минского завода отопительного оборудования, и жидкого стекла с $M_c = 1$ и $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$. Композиты могут быть рекомендованы для устройства оснований дорог низких категорий. □

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов : ГОСТ 3476-74.
2. Глуховский, В. Д., Рунова, Р. Ф., Максунев С. Е. Вяжущие и композиционные материалы контактного твердения. – Киев : Высшая школа, 1991. – 243 с.
3. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам : ГОСТ 10180-90.
4. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия : ГОСТ 23558-94.
5. Волков, Ф. Е. Роль растворов едкой щелочи в процессе формирования микроструктуры грунтобетона / Ф. Е. Волков // Строительные материалы. – 2003. – № 10. – С. 44–46.
6. Физико-химическая механика природных дисперсных систем / под ред. Е. Д. Щукина и др. – М. : Изд-во МГУ, 1985. – 264 с.

Статья поступила в редакцию 15.10.13.

