

Влияние модификаторов структуры шлакощелочного вяжущего на трещинообразование

И.И. Романенко, А.И. Фадин, И.Н. Петровнина, М.И. Романенко
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация: Цель исследования – определение эффективного модификатора структуры шлакощелочного камня, характеризующегося низкой величиной линейной усадки и снижением трещинообразования в ранние сроки твердения. Молотые доменные шлаки активировали водными растворами на основе силиката натрия и каустической соды. В качестве модификаторов структуры цементного камня использовали золу-уноса и цеолитсодержащую глину при дозировке 5, 10 и 15% от расхода вяжущего. Результаты исследования показали, что увеличение содержания золы-уноса не существенно влияет на сроки схватывания. Использование в качестве модификатора шлакощелочного вяжущего цеолитсодержащей глины дает возможность регулировать сроки схватывания вяжущего при дозировке более 10%. Трещинообразование шлакощелочной матрицы наблюдалось только для смесей без золы-уноса и цеолитсодержащей глины.

Ключевые слова: цементный камень, шлакощелочное вяжущее, активатор твердения, модификатор структуры, зола-унос, цеолиты, усадка, трещинообразование.

Шлакощелочное вяжущее (ШЩВ) получено в 1956 г и особенно широко использовалось с 1989 во всех странах мира [1-3]. Это можно объяснить интенсивным развитием черной металлургии и производства электроэнергии на тепловых электростанциях, в результате чего и образуется большое количество шлаков доменного производства и зол от сжигания углей [4-6]. Вяжущее на алюмосиликатных отходах металлургического производства активировалось щелочными водными растворами или силикатами натрия, калия и поташом. Установлено [6, 7], что физико-механические свойства гидравлического ШЩВ зависят от концентрации водного раствора щелочного активатора твердения, вида активатора, раствора-шлакового отношения (Р/Ш), температуры твердения.

Взаимодействие алюмосиликатов кальция с водным раствором щелочного активатора способствует образованию низкоосновных С-(N)-А-S-Н соединений, аналогичных фазе С-S-Н, формируемых в вяжущем на основе портландцемента [8-10].

Зола-уноса, как самостоятельное вяжущее, не используется. Для активации процессов твердения необходимо создание среды с $\text{pH} \geq 13$ и применение жидкого стекла или щелочи. В результате реакции образуется гидрогель типа $(\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2) \times n\text{H}_2\text{O}$ с низким содержанием связанной воды [11-13].

ШЩВ характеризовалось большой усадкой, короткими сроками схватывания, трещинообразованием и невысокими прочностными показателями [14-15]. Твердение в условиях тепловой обработки способствовало повышению прочностных показателей бетонов на основе ШЩВ [16-17]. Введение в ШЩВ в качестве добавки золы-уносы в количестве от 5-10% от массы молотого шлака способствует снижению прочностных показателей и не существенно влияет на изменение сроков схватывания ШЩВ [18-20].

Неэффективным является использование суперпластификаторов на основе меламина - формальдегида, нафталинсульфокислоты и поликарбоксилата для регулирования сроков схватывания ШЩВ и снижения усадки цементного камня [21-23].

Дозировка щелочного активатора в количестве 10-15% от массы молотого шлака и введения в вяжущее золы-уноса в количестве 10% от массы шлака способствовало повышению прочности на сжатие в возрасте 28 суток твердения на 8-15% относительно контрольных составов без золы-уноса [24-26]. В тоже время в ранние сроки твердения прочностные показатели аналогичны контрольным составам [4, 22, 27].

Установлено, что бетоны на основе комплексного ШЩВ (доменный шлак + зола-унос и водный раствор силиката натрия) обладают высокой автогенной усадкой из-за формирования мелкопористой структуры цементного камня в раннем возрасте твердения, что способствует развитию растягивающих напряжений в поверхностном слое и сжатию в ядре сечения

[26, 28]. С увеличением дозировки комплексного вяжущего растет и величина усадки. Величина линейной усадки превышает критические значения для бетонов на основе портландцемента.

Целью проведенных исследований является разработка составов ШЩВ, характеризующихся низкой величиной линейной усадки и снижением трещинообразования в ранние сроки твердения.

Исследовали молотый гранулированный доменный шлак Челябинского металлургического комбината (ЧМК) и Новолипецкого металлургического комбината (НМК). Химический состав шлаков представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых доменных шлаков

Наименование граншлака	Содержание оксидов, % в материале								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃	TiO ₂	FeO
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
НМК	33,8	4,6	0,3	35,4	1,5	0,86	0,4	0,1	0,4
ЧМК	37,8	20,25	1,2	33,9	4,0	1,65	5,35	-	0,56

Удельная поверхность молотых гранулированных шлаков составляла 2900-3100 см²/г. Помол шлаков, предварительно высушенных до влажности 3% в сушильном шкафу, измельчали в шаровой фарфоровой лабораторной мельнице.

Для модифицирования структуры цементной матрицы применяли золу-унос (Казанская ТЭЦ-2) и глину Лягушовского месторождения с включениями цеолитов до 28-32%. Цеолит, содержащийся в глине Лягушовского карьера, представляет собой минерал гепландит (Ca₄[Al₈Si₂₈O₇₂]₂₄H₂O), имеющий слоистую структуру с зернами размером 3-10 мм.

Зола-унос образуется от сжигания углей Кузнецкого бассейна в энергетической установке тепловой электростанции, который представляет собой тонкодисперсный материал осаждаемый на электрофильтрах в виде

пыли с размером частиц 0,01-0,1 мм с остеклованной поверхностью. Химический состав модификаторов структуры цементного камня представлен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав модификаторов структуры цементного камня

Наименование	Содержание окислов, % в материале								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O+Na ₂ O	P ₂ O ₅
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Зола-унос	54,7	23,5	6,43	2,16	1,88	0,69	0,96	2,86	0,16
Цеолитсодержащая глина	73,7	12,2	0,8	0,61	0,29	0,01	0,18	5,6	-

Для активации процессов твердения молотых шлаков использовали комплекс из жидкого стекла (силикат натрия) и каустической соды NaOH в соотношении 1:1 [23] при дозировке 8% от массы вяжущего (Ж.С+К.С-8).

В качестве мелкого заполнителя использовали Сурский речной песок с $M_{кр} = 1,15$ и крупный заполнитель – отсев от дробления гранитного щебня фракции 2,5-8,0 мм.

В исследованиях определены сроки схватывания цементных паст с модификаторами структуры и активатором твердения на основе жидкого стекла и каустической соды, а также физико-механические свойства бетонов на модифицированном ШЩВ, в том числе воздушная усадка цементного камня на образцах-балочках размером 40×40×160 мм.

Технология приготовления цементной пасты заключается в усреднении сухих ингредиентов до однородной массы в течение 2 минут с последующим введением водного раствора активатора твердения и перемешиванием до однородного состояния в течение 3 минут. На приборе Вика определяли сроки схватывания цементного теста (табл. 3).

Таблица 3

Влияние нормальной густоты и сроков схватывания цементного теста
 на шлакощелочное вяжущее

№ пп	Состав	Количество г/мл	Н.Г.,%	Сроки схватывания	
				Н.С., час-мин	К.С., час-мин
1	2	3	4	5	6
1	НМК $S_{вд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	400	21,5	0-25	0-35
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	86			
2	НМК $S_{вд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	380	22,5	0-30	0-38
	Зола-унос - 5%	20			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	90			
3	НМК $S_{вд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	360	25,4	0-32	0-40
	Зола-унос - 10%	40			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	102			
4	НМК $S_{вд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	340	27,6	0-34	0-42
	Зола-унос - 15%	60			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	110			
5	НМК $S_{вд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	400	25,0	0-40	0-50
	Цеолитсодержащая глина - 5%	20			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	100			
6	НМК $S_{вд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	360	31,25	0-45	0-52
	Цеолитсодержащая глина - 10%	40			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	125			
7	НМК $S_{вд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	340	34,5	0-47	1-10
	Цеолитсодержащая глина - 15%	60			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	138			
8	ЧМК $S_{вд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	400	25,5	0-15	0-26
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	102			
9	ЧМК $S_{вд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	380	25,5	0-21	0-29
	Зола-унос - 5%	20			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	102			

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6
10	ЧМК $S_{уд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	360	28,42	0-25	0-38
	Зола-унос - 10%	40			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	114			
11	ЧМК $S_{уд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	340	28,75	0-27	0-41
	Зола-унос - 15%	60			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	115			
12	ЧМК $S_{уд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	380	28,0	0-30	0-49
	Цеолитсодержащая глина - 5%	20			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	112			
13	ЧМК $S_{уд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	360	31,1	0-45	0-58
	Цеолитсодержащая глина - 10%	40			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	124			
14	ЧМК $S_{уд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$	340	35,6	0-56	1-14
	Цеолитсодержащая глина - 15%	60			
	Ж.С+К.С-8	48			
	Вода до	142			

Образцы для определения усадки в первые сутки твердения герметизировали с помощью пластиковой упаковочной пленки, а в дальнейшем они твердели в лабораторных условиях: температура $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и влажность $72 \pm 2\%$.

Для определения физико-механических свойств бетонных смесей изготавливались образцы-кубики размером $100 \times 100 \times 100$ мм и образцы-балочки размером $40 \times 40 \times 160$ мм. Время усреднения сухих компонентов бетонной смеси в лабораторной смесительной установке – 3 мин. После введения водного раствора активатора твердения перемешивание продолжалось до получения однородной бетонной смеси в течение 2 мин. Бетонная смесь в формах уплотнялась на лабораторной виброплощадке в течение 30 с. После формовки в стандартных формах бетонные образцы помещались в герметичные пластиковые пакеты на одни сутки для изоляции

от окружающей среды и снижения потерь влаги. Затем образцы помещались в камеру нормального твердения.

Прочностные показатели бетонов определяли в возрасте 7 и 28 суток твердения в камере нормального твердения (температура $+20\pm 5^{\circ}\text{C}$, влажность 90%). Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

Составы и физико-механические свойства ШЩБ на основе шлаков НМК и ЧМК

Составы	Расход материалов на 1 м^3 бетона, кг								Прочность на сжатие, МПа			
	НМК	Отсев гранитного щебня, фр. 2,0-8,0мм	Песок	(Ж.С+К.С-8) $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$	вода	Зола-унос	Цеолито-содержащая глина	Р/Ш	Твердение в нормальных условиях в возрасте, сут.		Твердение в нормальных условиях после ТВО, в возрасте, сут.	
									7	28	7	28
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
НМК-1	649	1000	624	52	233	–	–	0,36	25	47	46	56
НМК-2(5%)	616	1000	624	52	233	33	–	0,36	29	52	55	60
НМК-3(10%)	583	1000	624	52	233	66	–	0,36	27	50	54	58
НМК-4(15%)	552	1000	624	52	233	97	–	0,36	15	47	49	55
НМК-5(5%)	616	1000	624	52	233	–	33	0,36	24	44	44	57
НМК-6(10%)	583	1000	624	52	233	–	66	0,36	26	47	54	59
НМК-7(15%)	552	1000	624	52	233	–	97	0,36	12	38	40	51
ЧМК-1	649	1000	624	52	233	–	–	0,36	28	50	44	61
ЧМК-2(5%)	616	1000	624	52	233	33	–	0,36	26	49	56	63
ЧМК-3(10%)	583	1000	624	52	233	66	–	0,36	20	43	28	49
ЧМК-4(15%)	552	1000	624	52	233	97	–	0,36	14	22	24	43

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ЧМК-5(5%)	616	1000	624	52	233	–	33	0,36	28	36	40	63
ЧМК-6(10%)	583	1000	624	52	233	–	66	0,36	23	33	37	57
ЧМК-7(15%)	552	1000	624	52	233	–	97	0,36	20	28	33	46
ПТЦ Д0 42,5	550	1000	620	–	233	–	–	0,42	22	41	36	38

Примечание: Режим тепло-влажностной обработки составляет: 3 + 3 + 9 + 3, при температуре изотермической выдержки 80 °С.

Оценка трещинообразования на бетонных образцах оценивалась при твердении в лабораторных условиях в течение 30 суток после их изготовления. Деформации усадки измеряли микрометром часового типа на приборе УП-40 по стандартной методике ГОСТ 24544–81. Для каждого испытания использовались образцы-балочки размерами 40×40×160 мм, с наклеенными при формовке на торцы образцов центрирующих пластинок из нержавеющей стали размерами 5×5×0,2 мм. После формовки балочек на виброплощадке форма помещается в полиэтиленовую упаковку с целью герметизировать образцы от воздействия окружающей среды на 24 часа. По истечению суток, образцы извлекаются из формы, по металлическому стержню-эталоны устанавливается нулевой отсчет и затем снимается первый показатель с контрольных образцов-балочек.

Образцы-балочки повторно погружались в герметичный полиэтиленовый контейнер с поддержанием влажности 90%. Интервал снятия отсчетов через 24 часа в течение 28 суток.

Величина линейной усадки определялась по формуле:

$$\lambda = \frac{n_n - n_0}{l}$$

где: λ – линейная деформация усадки (мм/м);

n_n – отсчет при измерении образцов снятых с формы через сутки после формовки (мм);

n_0 – отсчеты при последующих измерениях образцов по программе испытаний (мм);

l – базовый размер образца 160 мм.

Введение золы-уноса в состав вяжущего вызывает замедление сроков схватывания шлакощелочного вяжущего. В контрольном составе № 1 (см. табл. 3) сроки начального схватывания цементного теста на основе шлаков НМК составляют 25 мин, а конец 35 мин, что создает неудобство при проведении бетонных работ. Регулирование сроков схватывания осуществляется изменением содержания модификатора структуры цементного теста. Максимальное содержание золы-уноса 15% от массы вяжущего обеспечивает начальное схватывание 34 мин, конец - 42 мин. По нормативным документам на вяжущее из портландцемента начало схватывание должно быть не ранее 45 мин. Таким образом, составы № 3 и № 4 не соответствуют требованиям стандартов и ТУ на вяжущее из портландцемента.

Модифицирование ШЩВ цеолитсодержащей глиной позволяет существенно изменить сроки схватывания и темпы набора прочности цементным камнем. Так, при введении 10% (см. табл. 3, состав № 6) время начального схватывания цементного теста составляет 45 мин, что удовлетворяет требования ТУ на вяжущее. При дозировке 15% от массы вяжущего время начала схватывания составляет 47 мин, а конец 70 мин. Это связано с тем, что минерал цеолитсодержащей глины адсорбирует воду, а с течением времени постепенно отдает ее системе, что и вызывает возможность влиять на сроки схватывания цементного теста.

При исследовании ШЩВ на основе ЧМК золой-уноса и цеолитсодержащей глиной были выявлены зависимости по изменению

свойств аналогичные вяжущим на основе НМК. Наибольшее замедление сроков схватывания установлено при дозировке модификаторов структуры вяжущего двух видов в количестве 15% от массы вяжущего.

Результаты исследования показали, что использование золы-уноса в количестве 5-10% от массы вяжущего на основе молотых шлаков НМК, увеличивали прочность на сжатие после тепло-влажностной обработки в возрасте 28 суток на 3-7%. При твердении в нормальных условиях в возрасте 28 суток прирост прочности составов № 2 и 3 (табл. 4) составил 6-10%. Дозировка модификатора структуры в количестве 15% обеспечила прочность бетонного образца (табл. 4, состав № 4) на уровне без добавочного состава № 1.

Аналогичная зависимость проявляется на вяжущем НМК с модификатором в виде цеолитсодержащей глины. Оптимальная дозировка составляет 5-10%. Дозировка цеолитсодержащей глины в количестве 15% приводит к снижению прочности на 20%.

Шлакощелочные бетоны на основе шлаков ЧМК показали снижение прочности на сжатие при увеличении дозировок модификаторов структуры цементного камня. Оптимальная дозировка золы-уноса, цеолитсодержащей глины составляет 5%. Прочность на сжатие аналогична контрольным образцам ШЩБ на основе молотого шлака ЧМК.

Автогенную усадку определяли для семи бетонных смесей, составов НМК-1, НМК-3 (10%), НМК-6(10%), ЧМК-1, ЧМК-3 (10%), ЧМК-6(10%), ПТЦ Д0 42,5 (табл. 4). Величина усадки бетонов (НМК-3 (10%), НМК-6 (10%), ЧМК-3 (10%), ЧМК-6 (10%) с модифицированной структурой щелочного камня выше усадки бетонов на основе портландцемента (ПТЦ Д0 42,5). Контрольные составы шлакощелочных бетонов НМК-1, ЧМК-1 имеют величину усадки бетонов, более, чем у бетонов на основе портландцемента на 173-400%.

Таблица 5

Трещинообразование бетонов при деформациях усадки

№ пп	Состав	Величина линейной усадки (воздушно-сухие условия) в возрасте сут., мм/м								
		1	4	8	10	12	16	20	24	28
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	НМК-1	0,18	0,41	0,84	1,0	1,25	1,36	1,45	1,44	1,45
2	НМК-3 (10%)	0,0	0,34	0,5	0,65	0,69	0,8	0,82	0,82	0,82
3	НМК-6 (10%)	0,0	0,17	0,28	0,3	0,36	0,38	0,40	0,42	0,41
4	ЧМК-1	0,1	0,37	0,74	0,85	0,92	1,24	1,21	1,24	1,24
5	ЧМК-3 (10%)	0,0	0,2	0,4	0,46	0,52	0,62	0,63	0,63	0,63
6	ЧМК-6 (10%)	0,0	0,13	0,24	0,26	0,27	0,3	0,32	0,36	0,36
7	ПТЦ Д0 42,5	0,0	0,15	0,19	0,19	0,2	0,24	0,24	0,27	0,28

Деформация воздушной усадки образцов-балочек из шлакощелочных бетонов на ранней стадии твердения обусловлена в первую очередь изменением объема гелевой структуры, во-вторых испарением несвязанной (свободной) воды и в-третьих расходом воды при гидратации тонкодисперсных частиц шлака. При этом наблюдается процесс уплотнения геля за счет давления воды, заземленной в структуре на перегородки геля. В то же время химические процессы, протекающие при твердении вяжущего, приводят к усадке бетона. Темпы усадочных деформаций бетонов с течением времени снижаются и в дальнейшем стабилизируются. Наиболее интенсивно деформация протекает в период от 4 до 20 суток.

Стабилизация процессов усадки тесно связана с наличием в составе бетонов, видом вяжущего, его количеством, крупностью заполнителя, количеством воды и видом химической добавки.

На образцах из шлакощелочных бетонов составов НМК-1 в возрасте 10 суток образовались паутинные трещины, максимальное раскрытие которых

наблюдается в возрасте 20 суток при воздушной усадке 1,45 мм/м и составляет 0,28 мм. У бетонов, модифицированных 10% золой-унос (НМК-3(10%)), в возрасте 20 суток на поверхности наблюдалась паутина волосяных трещин, но в дальнейшем их раскрытие не произошло. При дозировке 10% цеолитсодержащей глины (НИК-6(10%)) в составе ШЩВ образование трещин не происходит. Максимальная величина воздушной усадки бетонных балочек составляет 0,42 мм/м.

На бетонных образцах, приготовленных на доменном шлаке ЧМК (состав ЧМК-1), образовались поверхностные трещины в виде паутины на 16 сутки твердения. Величина усадки составляла 1,24 мм/м, ширина раскрытия трещины – 0,14 мм. Шлакощелочные бетоны, у которых вяжущее модифицировано в количестве 5, 10 и 15% золой-унос и цеолитсодержащей глиной, образование трещин в исследуемом временном интервале не обнаружено.

Исследования [1,24], показали, что шлакощелочные бетоны характеризуются мелкопористой структурой и повышенной прочностью, по сравнению с бетонами, полученными на портландцементе. Поэтому при потере влаги бетонами с порами больших размеров величина усадки минимальная и крупных, магистральных трещин не образуется.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- введение в качестве модификатора структуры ШЩВ золы-уноса не позволяет существенно изменять сроки схватывания цементного теста нормальной густоты;
- цеолитсодержащая глина позволяет регулировать сроками схватывания: увеличить время начала схватывания и время конца схватывания;

- регулировать сроками схватывания ШШВ за счет введения в его состав золы-уноса и цеолитсодержащей глиной возможно при дозировках более 10% от массы вяжущего;
- шлакощелочные бетоны на модифицированном вяжущем на основе доменных шлаков НМК и ЧМК, твердеющие в воздушно-влажных условиях, получают максимальные значения усадки во временном интервале от 4 до 20 суток; процесс стабилизации наблюдается после 20 суток твердения;
- наполнение шлакощелочной матрицы цеолитсодержащей глиной в количестве 10% снижает величину усадки на 70-75% в зависимости от используемого молотого доменного шлака;
- потеря влаги образцами является главной причиной деформации при усадке; наличие в составе шлакощелочного вяжущего цеолитсодержащей глины способствует удержанию влаги в образцах, благодаря чему трещин от усадки в бетонных образцах не наблюдается;
- введение модификатора структуры цементного камня в виде золы-уноса и цеолитсодержащей глины в количестве более 10% от массы вяжущего позволяет снизить процессы трещинообразования в ранние сроки твердения в воздушно-влажных условиях.

Литература

1. Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны. - Киев: Будивельник- 1978. - 184с
 2. Collins, F., and Sanjayan, J. (1999). Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cement Concrete Res.* 29. 455–458. doi: 10.1016/S0008-8846(98)00236-1
 3. Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., and Van Deventer, J. S. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement Concrete Res.* 37, 1590–1597. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.08.018
-

4. Chi, M., Chan, g., and Huang, R. (2012). Strength and drying shrinkage of alkali-activated slag paste and mortar. *Adv. Civil Eng.* 2012:579732. doi: 10.1155/2012/579732
5. Provis, J. L., and van Deventer, J. S. (2014). *Alkali Activated Materials. State of the Art Report of RILEM TC 224-AAM.* Dordrecht: Springer/RILEM. doi: 10.1007/978-94-007-7672-2_4
6. Liu, Y., Zhu, W., and Yang, E. (2016). Alkali-activated ground granulated blast-furnace slag incorporating incinerator fly ash as a potential binder. *Construct. Build. Mat.* 112, 1005–1012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.153
7. Фиговский О.Л. Кудрявцев П. Г. Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых нанокпозиционных материалов. // *Инженерный вестник Дона.* 2014. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2448
8. Jang, J., Lee, N., and Lee, H. (2014). Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers. *Construct. Build. Mat.* 50, 169–176. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.048
9. Wang, S., and Scrivener, K. L. (1995). Hydration products of alkali activated slag cement. *Cement. Concrete Res.* 25. 561–571. doi: 10.1016/0008-8846(95)00045-E
10. Myers, R. J., Bernal, S. A., Gehman, J. D., van Deventer, J. S., and Provis, J. L. (2015). The role of al in cross-linking of alkali-activated slag cements. *J. Am. Ceramic Soc.* 98, 996–1004. doi: 10.1111/jace.13360
11. Shi, C., Roy, D., and Krivenko, P. (2006). *Alkali-Activated Cements and Concretes.* New York, NY: CRC Press, Taylor & Francis. Doi: 10.4324/9780203390672
12. Myers, R. J., Bernal, S. A., San Nicolas, R., and Provis, J. L. (2013). Generalized structural description of calcium–sodium aluminosilicate hydrate gels:

the cross-linked substituted tobermorite model. *Langmuir* 29, 5294–5306. doi: 10.1021/la4000473

13. Škvára, F., Šlosar, J., Bohunek, J., and Marková, A. (2003). “Alkali-activated fly ash geopolymeric materials,” in *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement* (Durban: Cement and Concrete Institute), pp. 35-49.

14. Provis, J. L. (2014). Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? *Mat. Struc.* 47, pp.11–25. doi: 10.1617/s11527-013-0211-5

15. Walkley, B., Rees, G. J., San Nicolas, R., van Deventer, J. S., Hanna, J. V., and Provis, J. L. (2018). New structural model of hydrous sodium aluminosilicate gels and the role of charge-balancing extra-framework al. *J. Phys. Chem. C* 122, pp. 5673–5685. doi: 10.1021/acs.jpcc.8b00259

16. Bijen, J. (1996). Benefits of slag and fly ash. *Construct. Building Mat.* 10, pp. 309–314. doi: 10.1016/0950-0618(95)00014-3

17. Дворкин Л.И., Мироненко А.В., Орловский В.М., Пресман И.Г. Золощелочные бетоны // Бетон и железобетон. - 1991. № 5. С. 18-20.

18. Bernal, S. A., Provis, J. L., Walkley, B., San Nicolas, R., Gehman, J. D., Brice, D. G., et al. (2013). Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation. *Cement Concrete Res.* 53, 127–144. doi: 10.1016/j.cemconres.2013.06.007

19. Gao, X., Yu, Q., and Brouwers, H. (2015). Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag–fly ash blends. *Construct. Build. Mat.* 80, 105–115. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.065

20. Marjanović, N., Komljenović, M., Bašćarević, Z., Nikolić, V., and Petrović, R. (2015). Physical–mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash–blast furnace slag blends. *Ceramics Int.* 41, 1421–1435. doi: 10.1016/j.ceramint.2014.09.075

21. Keulen, A., van Zomeren, A., and Dijkstra, J. (2018). Leaching of monolithic and granular alkali activated slag-fly ash materials, as a function of the mixture design. *Waste Manage.* 78, 497–508. doi: 10.1016/j.wasman.2018.06.019
 22. Кривенко П.В., Рябова А.Г. Шлакощелочные вяжущие на основе зол и шлаков ТЭЦ // Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции: Тез. докл. 2-я Всесоюзн. науч.-практ. конференция.- Киев, 1984.С.131-133.
 23. Lee, N., and Lee, H. (2013). Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Construct. Build. Mat.* 47, 1201–1209. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.107
 24. Романенко И.И., Михайлина С.В., Белякова Е.А. Модификация шлакощелочного вяжущего цеолитсодержащей породой // Актуальные проблемы современного строительства. Сб. научных трудов Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2005– с. 212-213.
 25. Nath, P., and Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construc. Build. Mat.* 66, 163–171. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080
 26. Wardhono, A., Law, D. W., and Strano, A. (2015). The strength of alkali-activated slag/fly ash mortar blends at ambient temperature. *Proc. Eng.* 125, 650–656. doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.095
 27. Humad, A. M., Provis, J. L., and Cwirzen, A. (2018). Alkali activation of a high MgO GGBS – fresh and hardened properties. *Magaz. Concrete Res.* 70, 1–24. doi: 10.1680/jmacr.17.00436.
 28. Налимова А.В. Влияние комплексной полимерной добавки на прочность и усадочные деформации цементного камня // Инженерный вестник Дона. 2012. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/737
-



References

1. Gluhovskij V.D., Pahomov V.A. SHlakoshchelochnye cementy i betony [Slag-alkali cements and concretes]. Kiev: Budivel'nik. 1978. 184P.
2. Collins, F., and Sanjayan, J. Cement Concrete Res. 29.1999, pp. 455–458. doi: 10.1016/S0008-8846(98)00236-1
3. Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., and Van Deventer, J. S. Cement Concrete Res. 37.2007, pp. 1590–1597. doi: 10.1016/j.
4. Chi, M., Chan, g., and Huang, R. Adv. Civil Eng. 2012:579732. doi: 10.1155/2012/579732
5. Provis, J. L., and van Deventer, J. S. (2014). Dordrecht: Springer/RILEM. doi: 10.1007/978-94-007-7672-2_4
6. Liu, Y., Zhu, W., and Yang, E. Construct. Build. Mat.2016, 112, pp.1005–1012. doi: 10.1016/j.
7. Figovskij O.L. Kudryavcev P. G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2448
8. Jang, J., Lee, N., and Lee, H. Construct. Build. Mat. 50,2014, pp. 169–176. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.048
9. Wang, S., and Scrivener, K. L. Cement. Concrete Res. 1995, 25. Pp.561–571. doi: 10.1016/0008-8846(95)00045-E
10. Myers, R. J., Bernal, S. A., Gehman, J. D., van Deventer, J. S., and Provis, J. L. J. Am. Ceramic Soc. 2015, 98, pp. 996–1004. doi: 10.1111/jace.13360
11. Shi, C., Roy, D., and Krivenko, P. New York, NY: CRC Press, Taylor & Francis. 2006. doi: 10.4324/9780203390672
12. Myers, R. J., Bernal, S. A., San Nicolas, R., and Provis, J. L. Langmuir 2003, 29, pp.5294–5306. doi: 10.1021/la4000473

13. Škvára, F., Šlosar, J., Bohunek, J., and Marková, A. in Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement (Durban: Cement and Concrete Institute) 2003, pp.35-49
 14. Provis, J. L. *Mat. Struc.* 2014, 47, pp.11–25. doi: 10.1617/s11527-013-0211-5.
 15. Walkley, B., Rees, G. J., San Nicolas, R., van Deventer, J. S., Hanna, J. V., and Provis, J. L. *J. Phys. Chem. C.* 2018, 122, pp. 5673–5685. doi: 10.1021/acs.jpcc.8b00259.
 16. Bijen, J. *Construct. Building Mat.* 1996, 10. pp. 309–314. doi: 10.1016/0950-0618(95)00014-3.
 17. Dvorkin L.I., Mironenko A.V., Orlovskij V.M., Presman I.G. *Beton i zhelezobeton.* 1991, № 5. pp.18-20.
 18. Bernal, S. A., Provis, J. L., Walkley, B., San Nicolas, R., Gehman, J. D., Brice, D. G., et al. *Cement Concrete Res.* 2013,53, pp. 127–144. doi: 10.1016/j.
 19. Gao, X., Yu, Q., and Brouwers, H. *Construct. Build. Mat.* 2015, 80, pp.105–115. doi: 10.1016/j.
 20. Marjanović, N., Komljenović, M., Bašcarević, Z., Nikolić, V., and Petrović, R. (2015). *Ceramics Int.* 2015, 41, pp.1421–1435. doi: 10.1016/j.
 21. Keulen, A., van Zomeren, A., and Dijkstra, J. *Waste Manage.* 2018, 78, pp. 497–508. doi: 10.1016/j.
 22. Krivenko P.V., Ryabova A.G. *SHlakoshchelochnye cementy, betony i konstrukcii: Tez. dokl. 2-ya Vsesoyuzn. nauch.-prakt. konferenciya.* Kiev, 1984, pp.131-133.
 23. Lee, N., and Lee, H. *Construct. Build. Mat.* 2013, 47, pp. 1201–1209. doi: 10.1016/j.
 24. Romanenko I.I., Mihajlina S.V., Belyakova E.A. *Aktual'nye problemy sovremennogo stroitel'stva. Sb. nauchnyh trudov Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. – Penza, 2005, pp. 212-213.*
-



25. Nath, P., and Sarker, P. K. Construc. Build. Mat. 2014, 66, pp. 163–171. doi: 10.1016/j.
26. Wardhono, A., Law, D. W., and Strano, A. Proc. Eng. 2015, 125, pp. 650–656. doi: 10.1016/j.
27. Humad, A. M., Provis, J. L., and Cwirzen, A. (2018). Magaz. Concrete Res. 2018, 70, pp. 1–24. doi: 10.1680/
28. Nalimova A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012. № 1. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/737