

Строитель Донбасса. 2024. Выпуск 4-2024. С. 37 -44. ISSN 2617-1848 (print)
The Builder of Donbass. 2024. Issue 4-2024. P. 37 -44. ISSN 2617-1848 (print)

Научная статья
УДК 691.335:620.193.4
doi: 10.71536/sd.2024.4c29.5

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЩЕЛОЧЕАКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЭС

Николай Михайлович Зайченко¹; Дарья Юрьевна Букина²

^{1,2}Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия,
¹n.m.zaichenko@donnasa.ru, ²d.yu.bukina@donnasa.ru

Аннотация. По результатам химического и рентгенофазового анализа установлена более высокая реакционная способность молотого шлака в сравнении с зольной составляющей золошлаковой смеси Зуевской ТЭС для получения щелочеактивированных вяжущих веществ и бетонов на их основе. Поскольку определяющим фактором этого является практически полная аморфизация молотого шлака, особенно его алюмосиликатной составляющей, которая в золах в существенной мере закристаллизована. Разработаны составы и исследованы свойства бетонных смесей и бетонов на основе щелочеактивированных вяжущих из золошлаковых отходов. Исследована коррозионная стойкость бетонов на основе шлаковой и зольной составляющих золошлаковых смесей, активированных щелочью – гидроксидом натрия, в растворах соляной кислоты, сульфата натрия и хлорида магния. Установлена высокая коррозионная стойкость бетонов на основе вяжущего из щелочеактивированного молотого шлака ТЭС.

Ключевые слова: щелочеактивированные бетоны, молотый шлак, зола, прочность, коррозионная стойкость, глубина разрушения

Original article

CORROSION RESISTANCE OF ALKALI-ACTIVATED CONCRETE BASED ON ASH AND SLAG WASTE FROM THERMAL POWER PLANTS

Nikolay M. Zaichenko¹; Darya Y. Bukina²

^{1,2}Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,
¹n.m.zaichenko@donnasa.ru, ²d.yu.bukina@donnasa.ru

Abstract. On the results of chemical and X-ray phase analysis, a higher reactivity of ground slag in comparison with the ash component of the ash and slag mixture of the Zuyevskaya TPP for obtaining alkali-activated binders and concretes based on it were established in this article. Since the determining factor for this is the almost complete amorphization of ground slag, especially its aluminosilicate component, which is largely crystallized in ashes. The compositions of concrete mixtures and concretes based on alkali-activated binders from ash and slag waste have been developed and its properties have been researched. The corrosion resistance of concretes based on slag and ash components of ash and slag mixtures activated by alkali – sodium hydroxide, in solutions of hydrochloric acid, sodium sulfate and magnesium chloride has been researched. High corrosion resistance of concretes based on binders from alkali-activated ground slag of thermal power plants has been established.

Keywords: alkali-activated concretes, ground slag, ash, strength, corrosion resistance, depth of destruction



*Зайченко
Николай Михайлович*



*Букина
Дарья Юрьевна*

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

В последние годы стремительное развитие ресурсо-энергосберегающих технологий в строительной индустрии способствовало росту спроса на бетон с более высоким расходом так называемых цементирующих и пуццолановых материалов, в том числе золы тепловых электростанций, поскольку увеличение ее содержания в бетоне является одним из способов снижения расхода цемента [1, 2]. Применение отходов, образующихся в процессе функционирования теплоэлектростанций, представляет собой значимый аспект как с экономической, так и с экологической точки зрения, это обусловлено их значительным количеством, а также необходимостью значительных затрат на их утилизацию и хранение [3]. Утилизация золы является очень важной глобальной проблемой, которая, например, при производстве щелочеактивированных алюмосиликатных материалов позволяет не только расширить сырьевую базу строительной отрасли без увеличения использования природных минеральных ресурсов, но и снизить влияние парниковых газов (диоксид углерода CO_2 , оксиды азота NO_x), связанных с производством клинкерного цемента и бетона на его основе [4].

В будущем новые виды бетонов на основе альтернативных вяжущих (например, щелочных) могут обеспечить экологические и экономические преимущества наряду с улучшенными свойствами в сравнении с вяжущими на основе портландцементного клинкера [5]. Наиболее интенсивно ведутся исследования по разработке щелочеактивированных материалов, которые отличаются от клинкерных вяжущих химическим и минеральным составом; широким диапазоном сырьевой базы; повышенной стойкостью к воздействию атмосферной коррозии, химических сред, высокой температуры и радиации; широтой номенклатуры материалов на их основе и областей применения [6].

Известно, что основными продуктами гидратации портландцемента являются гидросиликаты кальция C-S-H и портландит Ca(OH)_2 , тогда как в результате щелочной активации алюмосиликатного сырья образуется аморфный или субкристаллический алюмосиликатный щелочесодержащий гель N-A-S-H , на основе которого кристаллизуются цеолитоподобные фазы, обеспечивающие повышенные

физико-механические свойства и химическую стойкость щелочеактивированных материалов за счёт химического и минералогического сходства с природными цеолитами [7]. Повышенная коррозионная стойкость бетонов, полученных на основе щелочеактивированных золошлаковых отходов ТЭС, которые в зарубежной практике классифицируются как «геополимеры» [8-14], позволяет рекомендовать их в качестве альтернативы цементного бетона в условиях воздействия растворов кислот и сульфатных вод [8].

В то же время, крупномасштабное применение золы в производстве активируемых щелочью материалов сдерживается несколькими техническими проблемами, в том числе непостоянством качества золы между электростанциями, даже в пределах одного предприятия. Эта изменчивость связана с непостоянством физических свойств, химического и минералогического состава угля, его теплотворной способности, режимов и технологии сжигания, способа улавливания золошлаковых отходов и удаления, места отбора из отвалов, применяемых на каждой электростанции. Так, содержание несгоревшего углерода, количество химически активных кремнезема и глинозема, гранулометрический состав и содержание стекловидной фазы в золе-уноса являются наиболее важными факторами, влияющими на процесс твердения – геополимеризацию [4, 6].

Установлено, что наиболее важным ограничением при выборе золошлаковых отходов является содержание тугоплавкой кристаллической фазы. Следует использовать отходы с максимальным содержанием аморфной фазы [6], так как степень кристалличности алюмосиликата обратно пропорциональна его реакционной активности, которая проявляется как степень его растворимости в условиях высокощелочной среды [4, 15]. При этом вид активатора и условия отверждения образцов оказывают определяющее влияние на свойства, структуру и механизм отверждения композиций на основе топливных зол и шлаков [16]. Так, геополимерные материалы, полученные щелочной активацией алюмосиликатного минерального сырья, в тех случаях, когда активатором выступает гидроксид натрия, имеют более кристаллическую структуру, чем геополимеры, полученные в результате активации силикатом натрия (жидким стеклом). При этом, чем выше степень кристалличности, тем более коррозионностойки геополимеры в агрессивных средах, таких, как растворы серной и уксусной кислоты [17]. Это явление при использовании активатора гидроксида натрия можно объяснить образованием более стабильной полимерной алюмосиликатной структуры с поперечными связями [18].

При совместном гидроудалении золы и шлака в отвалы, образуется золошлаковая смесь, представляющая собой согласно ГОСТ 25592-2019 «Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов» вторичные минеральные ресурсы, применяемые в качестве компонентов для изготовления бетонов для всех видов строительства. Золы и шлаки ТЭС являются продуктами термохимических и фазовых превращений минеральных компонентов топлива. В составе зол и шлаков тепловых электростанций

можно выделить преобладающие (более 10 % по массе), второстепенные (3-9 %), редкие (1-5 %) фазы. Основными химическими компонентами минеральной части зол, шлаков и золошлаковых смесей являются кремнезем, глинозем и оксиды железа, составляющие до 90 % от всей неорганической массы. Содержание сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO₃ находится в пределах 0,3-1,6 %, содержание СаО не превышает 5 %, известь в свободном виде отсутствует.

Ранее в исследованиях щелочеактивированных вяжущих как зарубежных, так и отечественных ученых на фактор различной степени аморфизации оксида алюминия в золе-уноса и шлаке ТЭС внимание не акцентировалось. Однако, в последние годы в ряде научных работ [6, 17, 20] было установлено, что шлаковая составляющая золошлаковой смеси проявляет большую активность по сравнению с золой, что может объясняться различиями в фазовом составе, а также дополнительной механоактивацией шлака в процессе его измельчения.

Предполагается, что вследствие высокой вязкости алюмосиликатных расплавов [19], в шлаке ТЭС, претерпевшем стадию плавления, глинозем должен находиться в стеклообразном состоянии, высокая его растворимость в щелочных растворах должна обеспечить синтез гидроалюмосиликатов типа R₂O·Al₂O₃·(2-4)SiO₂·nH₂O – основных структурообразующих соединений камня щелочного вяжущего.

Целью исследования является изучение коррозионной стойкости бетонов, полученных на основе щелочеактивированных золошлаковых отходов ТЭС – золы и шлака, что позволит прогнозировать долговечность разработанных составов.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Материалы и методы исследований

В исследованиях использованы зола (З) и шлак Зуевской ТЭС, размолотый в шаровой мельнице до тонкости помола по показателю остатка на сите № 0,08 мм не более 10-12 % (МШ). В качестве крупного заполнителя (КЗ) принят щебень из гранита (ЩГ) и шлака ТЭС (ЩШ), мелкого заполнителя (МЗ) – песок кварцевый (ПК) и на основе золошлаковой смеси ТЭС (ПШ).

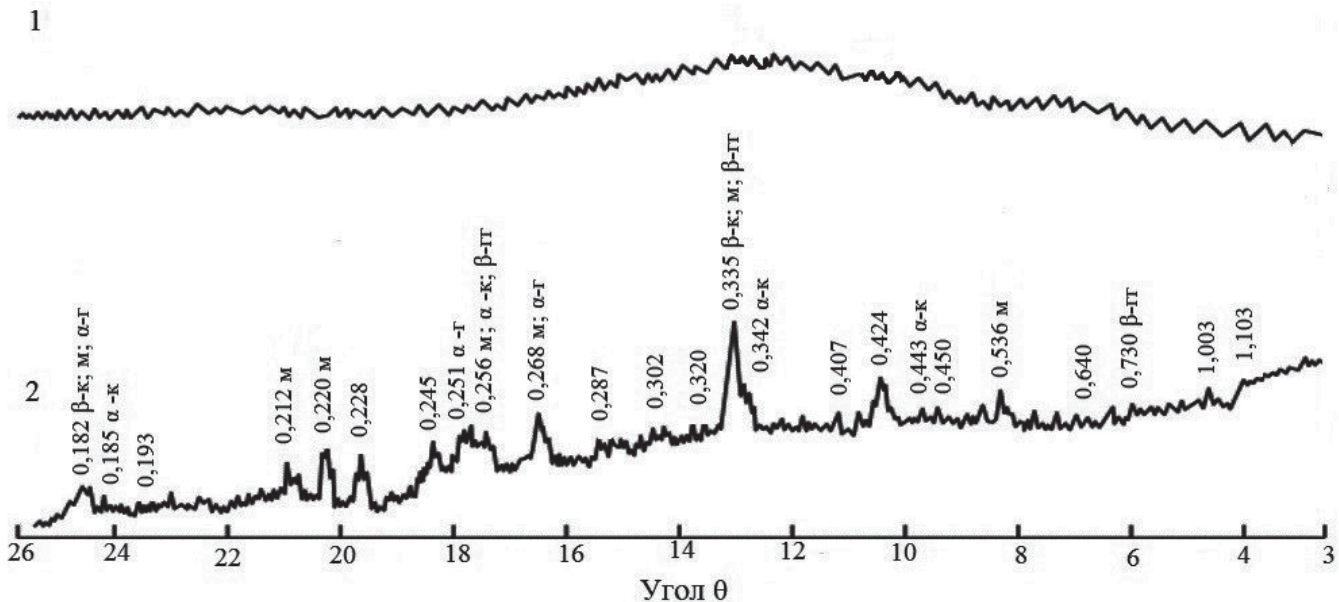
Химический состав отобранных проб золы и шлака ТЭС, приведенный в таблице 1, свидетельствует о том, что в шлаке, в отличие от золы составляющей, практически отсутствует несгоревший уголь – значение потерь при прокаливании (ППП) приближается к нулю. Кроме того, при соизмеримом содержании оксидов железа в шлаке более половины их присутствуют в виде двухвалентного железа.

Рентгенограммы шлака и золы (рис. 1) свидетельствуют о том, что шлаковая составляющая практически полностью аморфизирована. Напротив, в золе присутствует значительное количество кристаллических фаз – высокотемпературный (α-SiO₂) и низко-

Таблица 1.

Химический состав шлака и золы ТЭС

Материал	Содержание оксидов, % массы								ППП
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	R ₂ O	SO ₃	
Шлак	50,2	27,6	7,6	8,4	2,4	1,4	2,1	0,2	0,1
Зола	53,4	23,4	8,3	1,5	1,7	1,4	3,5	0,2	6,9



1 – шлаковая составляющая; 2 – золная составляющая; условные обозначения: α-К – высокотемпературный кварц (α-SiO₂), β-К – низкотемпературный кварц (β-SiO₂), М – муллит (3Al₂O₃·SiO₂), α-Г – гематит (α-Fe₂O₃), β-Г – гидрогематит (β-Fe₂O₃·H₂O)

Рис. 1. Рентгенограммы пробы золошлаковой смеси

температурный кварц ($\beta\text{-SiO}_2$), муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), α -гематит ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), β -гидрогематит. Причем глинозем в ней находится в виде кристаллического муллита.

В качестве щелочного компонента вяжущих применён технический гидроксид натрия (ГОСТ Р 55064-2012), являющийся наиболее дешевым и сильным растворителем алюмосиликатного стекла золошлаковых отходов. Гидроксид натрия вводился в бетоны в виде водного раствора плотностью 1,30 г/см³.

Образцы бетона твердели при тепловой обработке (ТО): пропаривание (П) и автоклавирование (А) по режиму: 2,5 часа – нагрев, 6 часов – изотермический прогрев, 3-4 часа – охлаждение. Температура изотермической выдержки при пропаривании составляла $95 \pm 1^\circ\text{C}$, при автоклавировании – 173°C (давление насыщенного пара – 0,8 МПа). Режим тепловлажностного твердения регулировался с помощью автоматических терморегуляторов, тепловлажностная обработка образцов производилась в формах.

Коррозионную стойкость бетона оценивали путем сравнения показателей образцов, твердевших в агрессивной и неагрессивной среде, для этого моделировались кислотная, магниевая и сульфатная коррозия. В качестве неагрессивной среды использовали дистиллированную воду. Согласно рекомендациям НИИЖБ [21] показатели агрессивности должны иметь следующие концентрации: кислотная – 3, 4, 5 рН; магниевая (Mg^{2+}) – 2000, 5000, 10000 мг/л; сульфатная (SO_4^{2-}) – 1000, 3000, 10000, 34000 мг/л. При испытании щелочеактивированного бетона приняты максимальные значения концентраций для всех видов коррозий. Для моделирования кислотной коррозии использовали раствор соляной кислоты с концентрацией ионов водорода 0,001 моль/л, что соответствует 3 рН. Для моделирования магниевой коррозии применяли порошок $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, растворенный в дистиллированной воде, в расчете на Mg^{2+} – 10 г/л. Массовая доля и плотность раствора должна быть 0,0377 и 1,0282 г/мл, что соответствует концентрации, согласно рекомендациям, 10000 мг/л. Сульфатная коррозия осуществлялась в растворе сульфата натрия плотностью 1,127 г/мл и концентрацией 153,2 г/мл, что соответствует содержанию SO_4^{2-} в растворе сульфата натрия – 34 г/л.

Исследования коррозионной стойкости бетонов производилось по методике НИИЖБ [21] на образцах-балочках $4 \times 4 \times 16$ см в растворах хлорида магния (магниевая коррозия), сульфата натрия (сульфатная коррозия) и соляной кислоты (кислотная коррозия). При определении коррозионной стойкости контрольные образцы после твердения помещались на решетчатый поддон таким образом, чтобы они со всех сторон контактировали с раствором. Расстояние между образцами составляло 5 см. Агрессивная жидкость менялась раз в три недели. Эталонные образцы погружались в емкость с дистиллированной водой, которая также менялась раз в две недели. По истечении двух лет образцы были испытаны на прочность при сжатии и при изгибе.

Коэффициент коррозионной стойкости бетона ($k_{\text{к.с.}} \geq 0,85$) рассчитывается как отношение предела прочности при сжатии (растяжение при изгибе) образцов, хранившихся в агрессивной среде, к прочности образцов, хранившихся в неагрессивной среде. Приведенная глубина разрушения бетона при испытании образцов на сжатие рассчитывается по формуле

$$\delta T = 0,5 \cdot a \cdot [1 - (P_{\text{к}}/P_{\text{н}})^{1/2}], \quad (1)$$

а при испытании на растяжение при изгибе по формуле

$$\delta T = 0,5 \cdot a \cdot [1 - (P_{\text{к}}/P_{\text{н}})^{1/3}], \quad (2)$$

где a – размер сечения образца, см²; $P_{\text{к}}$ – разрушающая нагрузка для прокорродированного образца, МПа; $P_{\text{н}}$ – разрушающая нагрузка для параллельного образца, хранившегося в воде, МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Номинальные составы бетонов, свойства бетонных смесей и бетонов приведены в таблице 2. Установлено, что предел прочности при сжатии бетона на основе щелочеактивированного молотого шлака после твердения в условиях пропаривания (состав № 1) практически в два раза выше в сравнении с составом № 4 на основе активированной золы. Автоклавная обработка обеспечивает более высокие прочностные показатели бетонов, при этом составы на основе шлака имеют показатель выше в сравнении с составами на основе золы на 51,7 % и 38,2 % (соответственно на

Таблица 2.

Номинальные составы бетонов, свойства бетонных смесей и бетонов

№ п/п	Расчетный расход, кг/м ³						Р-ор NaOH, л/кг	$\rho_{\text{б.см.}}$, кг/м ³	ОК, см	ТО	$R_{\text{сж}}$, МПа
	МШ	З	КЗ 5-10 мм		МЗ 0,16-5 мм						
			ЩГ	ЩШ	ПК	ПШ					
1	550	-	1100	-	550	-	200	2360	4	П	22,5
2	550	-	1100	-	550	-	200	2360	4	А	38,4
3	550	-	-	1100	-	550	200	2350	3	А	33,4
4	-	550	1100	-	550	-	200	2345	3	П	11,6
5	-	550	1100	-	550	-	200	2340	3	А	25,3
6	-	550	-	1100	-	550	200	2348	2	А	24,2

основе гранитного щебня и шлакового щебня). Следует также отметить, что показатель подвижности по осадке конуса бетонных смесей на основе молотого шлака также выше в сравнении с составами на основе золы, несмотря на то, что ее частицы представлены преимущественно остеклованными сфероидами. Тем не менее, высокие показатели потерь при прокаливании ухудшают удобоукладываемость смесей.

Расчет коэффициента коррозионной стойкости $k_{к.с.}$ и приведенной глубины разрушения δT после выдержки образцов щелочеактивированного бетона в агрессивных растворах по результатам испытаний прочностных характеристик (рис. 2) представлены в таблице 3. Результаты свидетельствуют, что все составы бетона выдержали испытания в растворе сульфата натрия (моделирование сульфатной коррозии) – изменение предела прочности при сжатии и при изгибе не превышает 15 %.

Повышенная стойкость к сульфатной коррозии геополимерных материалов обусловлена тем, что в

продуктах их твердения нет высокоосновных гидроалюминатов кальция, вызывающих сульфатную коррозию цементов [17]. В то же время, стойкостью к магниезиальной коррозии обладают только составы бетона, полученные на основе щелочеактивированного шлака при твердении материала в условиях автоклавной обработки (составы №№ 2, 3), а воздействие соляной кислоты выдержал только состав № 2. Очевидно, с одной стороны, молотый шлак проявляет большую реакционную способность в сравнении с золой за счет повышенного содержания аморфной фазы, с другой стороны, только в условиях автоклавирования формируется наиболее упорядоченная, хорошо закристаллизованная структура бетона, обеспечивающая его повышенную коррозионную стойкость.

Внешний вид поверхности и поперечного сечения образцов бетона составов №№ 2 и 3 показывает также отсутствие каких-либо визуальных разрушений (рис. 3).

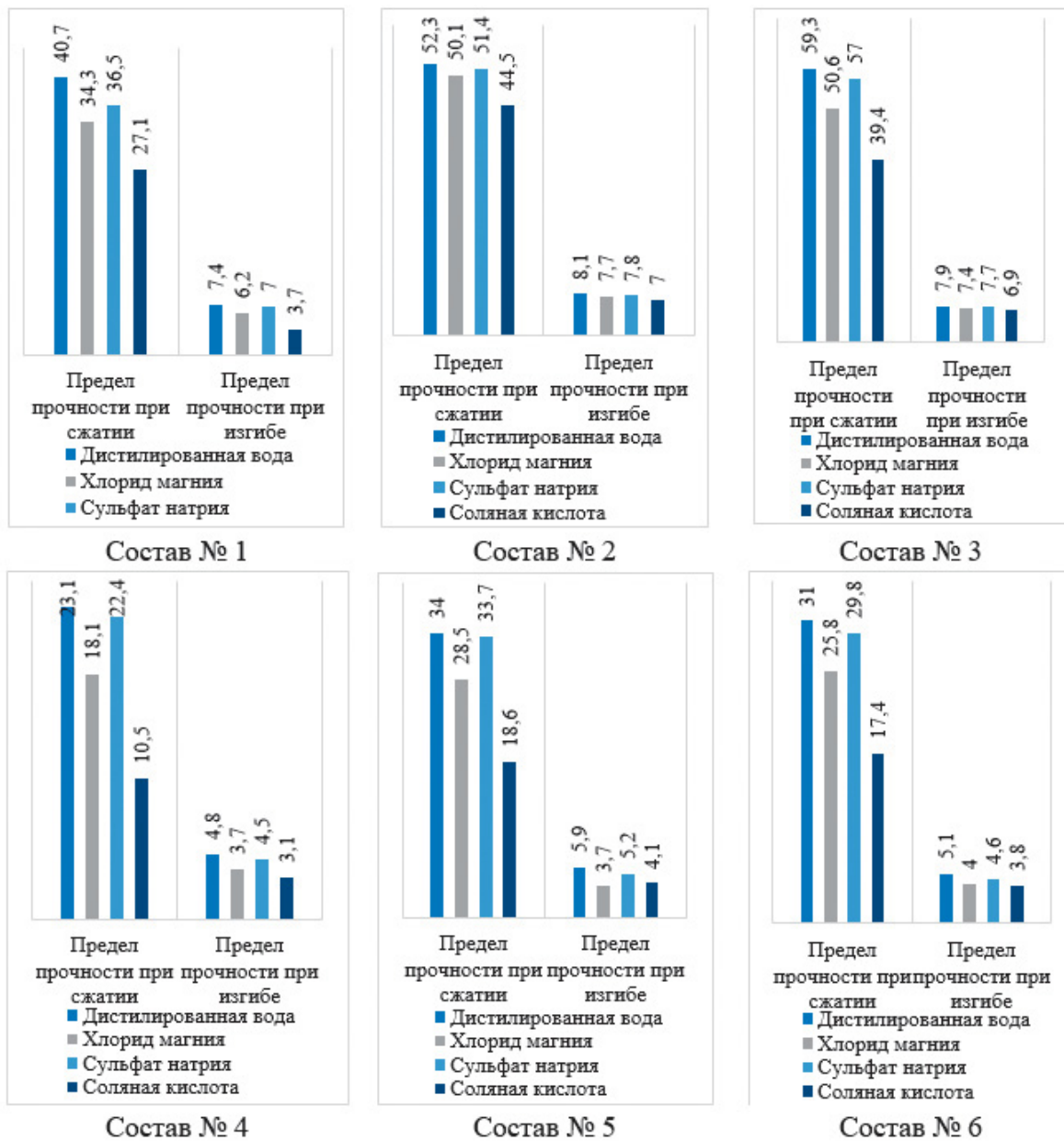


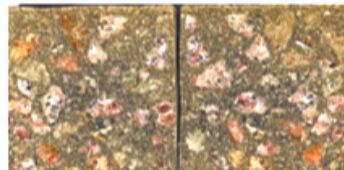
Рис. 2. Предел прочности при сжатии и изгибе образцов щелочеактивированного бетона после выдержки в дистиллированной воде и агрессивной среде

Таблица 3.

Глубина разрушения и коэффициент коррозионной стойкости щелочеактивированных бетонов

Показатель	Состав бетона, №					
	1	2	3	4	5	6
	Выдерживание в растворе					
	хлорида магния					
$k_{к.с.}(R_{изг})$	0,84	0,95	0,94	0,77	0,78	0,78
$k_{к.с.}(R_{сж})$	0,84	0,96	0,85	0,78	0,84	0,83
$\delta_T(R_{изг})$	0,45	0,13	0,17	0,66	0,63	0,62
$\delta_T(R_{сж})$	0,66	0,17	0,61	0,92	0,66	0,70
	сульфата натрия					
$k_{к.с.}(R_{изг})$	0,95	0,96	0,97	0,94	0,88	0,90
$k_{к.с.}(R_{сж})$	0,89	0,98	0,96	0,97	0,99	0,96
$\delta_T(R_{изг})$	0,15	0,09	0,07	0,17	0,33	0,27
$\delta_T(R_{сж})$	0,42	0,07	0,16	0,12	0,04	0,16
	соляной кислоты					
$k_{к.с.}(R_{изг})$	0,50	0,86	0,87	0,65	0,69	0,75
$k_{к.с.}(R_{сж})$	0,67	0,85	0,66	0,45	0,55	0,56
$\delta_T(R_{изг})$	1,64	0,38	0,36	1,07	0,91	0,74
$\delta_T(R_{сж})$	1,47	0,62	1,48	2,62	2,09	2,00

Образцы бетона состава №2



Образцы бетона состава №3

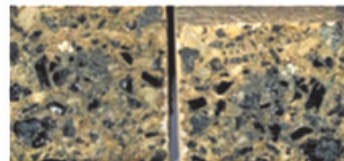
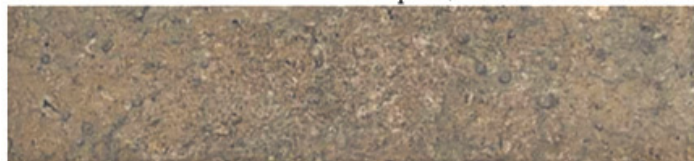


Рис. 3. Поверхность и поперечное сечение образцов бетона после выдержки в растворе соляной кислоты в течение двух лет

ВЫВОДЫ

В ходе выполнения экспериментальных исследований установлено:

1. По данным химического анализа шлаковая составляющая характеризуется большим содержанием глинозема и практически полным отсутствием несгоревшего углерода в сравнении с зольной составляющей золошлаковой смеси. Кроме того, при соизмеримом содержании оксидов железа в шлаке более половины их присутствуют в виде двухвалентного железа. Рентгенограммы шлака и золы свидетельствуют о том, что шлаковая составляющая практически полностью аморфизирована. Напротив, в золе присутствует значительное количество кристаллических фаз – высокотемпературный (α - SiO_2) и низкотемпературный кварц (β - SiO_2), муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), α -гематит (α - Fe_2O_3), β -гидрогематит. Причем глинозем в ней находится в виде кристаллического муллита.

2. Предел прочности при сжатии бетона на основе щелочеактивированного молотого шлака после твердения в условиях пропаривания практически в два раза выше в сравнении с составом на основе золы. Автоклавная обработка обеспечивает более высокие прочностные показатели бетонов, при этом составы на основе шлака имеют показатель выше в сравнении с составами на основе золы на 51,7 % и 38,2 % (соответственно на основе гранитного щебня и шлакового щебня).

3. Результаты свидетельствуют, что все составы бетона выдержали испытания в растворе сульфата натрия – изменение предела прочности при сжатии и при изгибе не превышает 15 %. В то же время, стойкостью к магниальной и кислотной коррозии обладают только составы бетона, полученные на основе щелочеактивированного молотого шлака ТЭС при твердении материала в условиях автоклавной обработки.

Список литературы

1. Белякова, В. С. Практическое применение зол ТЭЦ в промышленности строительных материалов / В. С. Белякова, В. С. Демьянова. — Текст : электронный // Вестник магистратуры. — 2014. — № 9(36). — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wykonb> (дата обращения: 02.09.2023). — Режим доступа : Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.
2. Худякова, Л. И. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций / Л. И. Худякова, А. В. Залуцкий, П. Л. Палеев. — Текст : непосредственный // XXI век. Техносферная безопасность. — 2019. — № 3(15). — <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2019-3-375-391>.
3. Самойлова, Е. Э. Выбор оптимальных направлений использования золошлаковых отходов / Е. Э. Самойлова, Е. Д. Гатина, О. В. Самойлова. — Текст : непосредственный // Строитель Донбасса. — 2022. — Выпуск 4-2022. — С. 4-8. — ISSN 2617-1848.
4. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements — A step towards sustainable building material and waste utilization / J. Shekhovtsova, I. Zhernovsky, M. Kovtun [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. — 2018. — Volume 178. — 22e33. — <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.270>.
5. Буравчук, Н. И. Влияние техногенного сырья на свойства бетонов / Н. И. Буравчук, О. В. Гурьянова // *Инноватика и экспертиза : научные труды*. — 2018. — № 2(23). — С. 159-172. — Текст : непосредственный.
6. Антонова, О. С. Оценка возможности использования золошлаковых отходов топливно-энергетического комплекса для синтеза безобжиговых композиционных материалов строительного назначения / О. С. Антонова, Н. Н. Клименко, Л. М. Делицын // *Успехи в химии и химической технологии*. — 2018. — Том 32, № 2(198). — С. 31-33. — EDN : YOHLVD. — Текст : непосредственный.
7. Shi, C. Recent progress in low-carbon binders // C. Shi, B. Qu, J. L. Provis // *Cement and Concrete Research*. — 2019. — Volume 122. — P. 227-250. — <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.009>.
8. Ерошкина, Н. А. Перспективы применения геополлимерных бетонов в качестве коррозионностойкой альтернативы портландцементного бетона / Н. А. Ерошкина, М. О. Коровкин, И. Ю. Лавров // [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-geopolimernyh-betonov-v-kachestve-korrozionnostoykoj-alternativy-portlandtsementnogo-betona/viewer> (дата обращения: 15.09.2024).
9. Davidovith, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials / J. Davidovith. — Text : direct // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. — 1991. — No. 37(8). — P. 1633-1656. — DOI: 10.1007/BF01912193.
10. Davidovith, J. Geopolymers chemistry and properties / J. Davidovith. — Text : direct // *First European Conference on Soft Mineralurge «Geopolymers-88» : conference proceedings (Compiègne, 1-3 June 1988)*. — Saint-Quentin : Institut Géopolymère, 1988. — P. 25-48.
11. Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence / Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, H. Wang // *Cement and Concrete Research*. — 2014. — Volume 64. — P. 30-41. — <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.004>.
12. Herrmann, A. Structural concrete based on alkali-activated binders: Terminology, reaction mechanisms, mix designs and performance / A. Herrmann, A. Koenig, F. Dehn // *Structural Concrete*. — November 2017. — P. 1-12. — DOI: 10.1002/suco.201700016.
13. Provis, J. L. Alkali-activated materials / J. L. Provis. — Text : direct // *Cement and Concrete Research*. — 2018. — Volume 114. — P. 40-48. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>.
14. The European research project GEOASH: geopolymer cement based on European coal fly ashes / J. Davidovits, M. Izquierdo, X. Querol [et al.] // *Geopolymer Institute Library*. — 2014. — Technical Paper #22. — www.geopolymer.org.
15. Структурообразование в щелочеактивированных алюмосиликатных вяжущих системах с использованием природного сырья различной кристалличности / Н. И. Кожухова, В. В. Строчкова, М. И. Кожухова, И. В. Жерновский. — Текст : непосредственный // *Строительные материалы и изделия*. — 2018. — Том 1, № 4. — С. 38-43.
16. Bakharev, T. Resistance of geopolymer materials to acid attack / T. Bakharev // *Cement and Concrete Research*. — 2005. — Volume 35(4). — P. 658-670. — DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.06.005.
17. Голосова, А. Н. Влияние вида щелочного активатора на структуру и механические свойства композиций на основе отходов ТЭК / А. Н. Голосова, Н. Н. Клименко, Л. М. Делицын // *Успехи в химии и химической технологии*. — 2019. — Том 66, № 4. — С. 51-53.
18. Ерошкина, Н. А. Химическая коррозия геополлимерных строительных материалов / Н. А. Ерошкина, М. О. Коровкин, М. Ф. Теплова // *Современные научные исследования и инновации*. — 2015. — № 3, Ч. 2 [Электронный ресурс]. — URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/03/51026> (дата обращения: 14.03.2024).
19. Роусон, Г. Неорганические стеклообразующие системы / Г. Роусон ; перевод с английского Немилова С. В. и Виноградовой Г. З. — Москва : Мир, 1970. — 312 с. — Текст : непосредственный.
20. Букина, Д. Ю. Щелочные вяжущие и бетоны на основе зол и шлаков ТЭС / Д. Ю. Букина, Н. М. Зайченко // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. — 2023. — № 1(159). — С. 89-97. — EDN ALPSCA.
21. Рекомендации по методам определения коррозионной стойкости бетонов / НИИЖБ Госстроя СССР. — Москва : НИИЖБ Госстроя СССР, 1988. — 24 с. — Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Зайченко Николай Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: высокопрочные и особо высокопрочные бетоны на основе модифицированных дисперсных компонентов бетона, щелочеактивированные вяжущие и бетоны.

Букина Дарья Юрьевна – инженер отдела сопровождения и мониторинга научной деятельности научно-исследовательской части, ассистент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: щелочеактивированные вяжущие и бетоны.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zaichenko Nikolay M. - D. Sc. (Eng.), Professor, Department of Construction Technologies of Structural Elements, Products and Materials, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: High-strength and ultra-high-strength concretes based on modified dispersed concrete components, alkali-activated binders and concretes.

Bukina Darya Y. – Engineer, Department of Scientific Research and Monitoring of Scientific Activities, Assistant, Department of Construction Technologies of Structural Elements, Products and Materials, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: alkali-activated binders and concretes.

*Статья поступила в редакцию 06.11.2024; одобрена после рецензирования 15.11.2024; принята к публикации 22.11.2024.
The article was submitted 06.11.2024; approved after reviewing 15.11.2024; accepted for publication 22.11.2024.*