
Сцепление арматурных стержней с щелочной матрицей шлакощелочных бетонов

И.И. Романенко, И.Н. Петровнина

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

Аннотация. Шлакощелочное вяжущее (ШЩВ) получают путем полимеризации измельченного в шаровой мельнице гранулированного доменного шлака (алюмосиликатный компонент) щелочным активатором, в результате чего образуется экологически чистое гидравлическое полимерное вяжущее. Шлакощелочной бетон (ШЩБ) на основе ШЩВ стал альтернативой традиционному бетону на основе портландцемента (ПТЦ). Арматурные стержни в сочетании с ШЩБ позволяют получить бетонные конструкции, обладающие высокими сцепными свойствами с арматурой по сравнению с бетонами на основе портландцемента. Однако, из-за различий в процессе производства ШЩБ, существуют явные различия в технических свойствах, включая характеристики сцепления. Для его производства и эксплуатационных испытаний необходима надлежащая стандартизация, чтобы ограничить противоречие в результатах, полученных в лаборатории и на стройплощадке.

Ключевые слова: отходы металлургического производства, граншлак, измельчение, химическая активация, арматура, сцепление, прочность.

Целью проведенных исследований является изучение свойств сцепления шлакощелочных бетонов с арматурой, т.к. это является необходимым условием для разработки стандартов и спецификаций для армированного геополимербетона.

Шлакощелочные бетоны – это геополимеры и представляют искусственные алюмосиликаты со структурой, сходной со структурой природных цеолитов [1, 2]. Материалы, используемые для производства геополимера - это природные или искусственные минералы, обогащенные аморфным SiO_2 и Al_2O_3 , например, все виды металлургических шлаков, зола унос, метакаолин [3]. ШЩВ получают в результате активации щелочью реакционной способности SiO_2 и Al_2O_3 , при котором стекловидные структуры исходного материала приобретают вяжущие свойства, способные твердеть не только на воздухе, но и в водных условиях [4, 5]. Реакция между алюмосиликатными материалами и щелочным раствором приводит к

образованию полимерной цепочечной структуры, представленной связью Si-O-Al. Эти цепочки соединены мостиками из атомов кислорода, образуя трехмерную, аморфную или некристаллическую сетчатую структуру из геополимера.

ШЩВ обладают многочисленными преимуществами в качестве вяжущего для бетона благодаря их отличному химическому и физическому составу [6, 7]. Например, полимерная цепочка и аморфная структура ШЩВ обеспечивают прочную адгезию с заполнителями [8] и, следовательно, обеспечивают плотный бетон с меньшей пористостью, что приводит к более высокому сопротивлению растяжению и пенирации, чем у традиционного портландцемента (ПТЦ) [9].

Стоит отметить, что химическая структура ШЩВ наделяет его множеством преимуществ, таких, как защита от воздействия кислот [10] и сульфатов, а также хлоридов, электропроводности и теплоизоляции, что указывает на большой потенциал применения в морской среде и химической и металлургической промышленности [11, 12].

Проведенные многочисленные исследования ШЩВ не привели к единому пониманию о методах оценки сцепления ШЩВ и арматурных стержней.

Сцепление - это наиболее важное взаимодействие между стальными или другими арматурными стержнями и бетоном [13]. Он передает напряжение между двумя материалами, сталью и бетоном. Сцепление позволяет двум различным материалам действовать вместе как единое целое [14]. Недостаточное сцепление арматуры с бетоном приводит к проскальзыванию арматуры и снижению прочности и жесткости несущих конструкции, что может привести к разрушению. Сцепление в основном происходит за счет химической адгезии, трения и механической анкеровки арматуры в бетоне.

Химическая адгезия возникает в результате химической реакции между поверхностью стали и раствором на основе вяжущего (рН среды, количества воды и поверхностью арматуры); трение возникает между арматурой и затвердевшим бетоном (поверхностью арматуры); механическая анкеровка арматурных стержней обусловлена сцеплением поверхности арматуры с бетоном и формой ребер на поверхности арматуры).

Понимание связи между арматурой и ШЩБ имеет важное значение для обеспечения целостности конструкций и ее долговечности. Сцепление арматуры с бетоном влияет на способность перераспределять нагрузку [15], сопротивляться трещинообразованию [16] и общую прочность армированных бетонных конструкций. Прочность сцепления, распределение напряжений в армированных ШЩБ позволяют инженерам-проектировщикам точно прогнозировать поведение этих конструкций при различных условиях нагружения. Полученные данные необходимы для разработки стандартизированных методов испытаний ШЩБ, руководств и норм проектирования.

Материалы и методы исследования

Щелочной активатор, используемый при получении ШЩБ – жидкое стекло (Ж.С) $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \times n\text{H}_2\text{O}$ с плотностью $1,56 \text{ кг/м}^3$ с силикатным модулем $M_c = 1,65$ и натриевая щелочь NaOH , которые для удобства растворялись водой питьевой до концентрации сухих веществ $\text{CO}=29 \text{ г/100 мл}$ раствора.

В лабораторных условиях по программе испытаний смешивали водные растворы щелочи и силиката натрия предварительно перед добавлением в сухую бетонную смесь. Эта комбинация щелочных активаторов помогает инициировать реакцию геополимеризации и способствует образованию полимергелевой матрицы.

В качестве вяжущего применяли для контрольного состава ЦЕМ I 42,5 N (ПТЦ М500) и гранулированный молотый доменный шлак новоліпецкого

металлургического комбината (НМЛК). Граншлак подвергали помолу в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности $S_{уд} = 2850 \text{ см}^2/\text{г}$. Химический состав вяжущих представлен в таблице № 1.

Таблица № 1

Химический состав доменного шлака и портландцемента

Исследуемый материал	Содержание масс. %										
	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	S	Fe ₂ O ₃	SrO
ЦЕМ I 42,5 N	20-23	60-75	2-4	4-7	–	–	–	–	–	1-4	–
Доменный граншлак НМЛК	28,83	52,13	7,61	5,98	1,09	0,31	2,61	0,27	0,36	0,37	0,15

Крупный заполнитель – щебень (габро – диабазовый) фракции 5-10 мм;

Мелкий заполнитель – песок Богословского карьера пензенской области с модулем крупности $M_{кр} = 1,54$.

Арматура переодического профиля диаметром 14 мм класса А400 (АШ), арматура гладкая диаметром 14 мм класса А240 (АГ).

Формовались балочки ШЩБ размером 100×100×400 мм в съемных металлических формах и кубики размером 100×100×100 мм в которые перед бетонированием по центру вставлялась и фиксировалась арматура.

Бетонные призмы и кубики формовались на лабораторном вибростоле, затем образцы выдерживались на воздухе в течение 4 часов перед термовлажностной обработкой (ТВО). Режим ТВО: 3+8+3 с температурой изотермической выдержки 75-80⁰С. В дальнейшем образцы хранились в камере нормального твердения (НТ) 28 суток (температура 20-25⁰С, влажность W= 90-95%). Испытания проводились на прочность и на выдергивание арматуры из ШЩБ в возрасте 1 суток после ТВО и через 28 суток твердения в камере НТ. Испытания происходили на гидравлическом прессе. В таблице № 2 представлены данные испытаний ШЩБ.

Таблица № 2

Результаты испытаний ШЩБ

№ состава	Расход ингредиентов бетонной смеси на 1 м ³ , кг							Р/Ш отношение	R _{из} , МПа	R _{сж} , МПа	R _{пр} прочность на продавливание арматуры, МПа
	шлак	Песок	Щебень	ПТЦ М500	Ж.С.%	NaOH,%	Вода				
1	455	482	1600	-	2,5	2,5	100	0,36	5,5	33,3	(АШ) 14,61 (АІ) 5,66
	После ТВО твердение 28 суток в камере НТ								8,7	39,8	(АШ) 17,53 (АІ) 6,6
2	398	567	1400	-	2,5	2,5	112	0,41	5,7	24,9	(АШ) 11,37 (АІ) 5,48
	После ТВО твердение 28 суток в камере НТ								6,5	28,6	(АШ) 12,96 (АІ) 6,42
3	420	590	1325	-	5,0	1,0	106	0,4	7,7	34,2	(АШ) 15,39 (АІ) 6,28
	После ТВО твердение 28 суток в камере НТ								9,5	41,1	(АШ) 17,88 (АІ) 7,73
4	420	590	1325	-	1,0	5,0	113	0,42	7,1	16,6	(АШ) 9,36 (АІ) 3,65
	После ТВО твердение 28 суток в камере НТ								8,0	19,1	(АШ) 11,17 (АІ) 4,79
5	420	454	1510	-	5,0	1,0	96	0,37	8,0	46,6	(АШ) 18,94 (АІ) 6,76
	После ТВО твердение 28 суток в камере НТ								9,7	56,3	(АШ) 22,54 (АІ) 8,06
6	523	523	1299	-	4,0	1,0	116	0,32	7,6	34,2	(АШ) 15,27 (АІ) 5,27
	После ТВО твердение 28 суток в камере НТ								8,8	40,6	(АШ) 17,79 (АІ) 6,39
7	-	820	1125	316	-	-	150	0,47	5,5	24,2	(АШ) 12,89 (АІ) 3,52
	После ТВО твердение 28 суток в камере НТ								6,3	29,3	(АШ) 14,3 (АІ) 3,95

Из анализа данных таблицы № 2 видно, что прочность на сжатие ШЩБ возрастает с увеличением соотношения щелочной активатора и расхода

молотого шлака и снижается с увеличением соотношения воды по отношению к щелочному активатору.

Было показано, что увеличение количества силикат-ионов в комбинированном щелочном активаторе существенно повышает конечную прочность затвердевших изделий.

Исследования были направлены на понимание влияния различных параметров на прочность ШЩБ при сжатии, включая выбор и соотношение щелочных активаторов. Выявлено, что оптимальная дозировка щелочного активатора составляет 6 % от массы молотого шлака при соотношении $\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SiO}_3 \times n\text{H}_2\text{O} = 1 \% : 5 \%$. Прочность на сжатие ШЩБ в возрасте 28 суток составляет 56,3 МПа, в то время как при соотношении $\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SiO}_3 \times n\text{H}_2\text{O} = 5 \% : 1 \%$ прочность на сжатие ШЩБ в возрасте 28 суток составляет 19,1 МПа.

При испытаниях на выдергивание выделяют два основных способа разрушения сцепления – разрушение ШЩБ и выдергивание стержня. Раскалывание бетона происходит, когда радиальные усилия от ребристого арматурного стержня превышают предел прочности бетона при растяжении, вызывая развитие трещин перпендикулярно стержню. Разрушение бетона при раскалывании определяется деформацией поверхности арматурных стержней и прочностью бетона на разрыв; высокие ребра на поверхности арматурных стержней создают большие радиальные усилия, которые раскалывают окружающий бетон с низкой прочностью на разрыв. Высокая прочность ШЩБ на разрыв обеспечивает лучшую устойчивость к раскалыванию ребристых стержней. При разрыве стержень отсоединяется и выскальзывает без податливости стержня или раскалывания бетона, что свидетельствует о плохой химической / механической сцепке на границе раздела. Это происходит с гладкими стержнями из бетона с низкой

прочностью. Более вероятно вытягивание арматурных стержней из бетона при недостаточной длине заделки.

Прочность составов № 2 и № 4 ШЩБ на выдергивание арматурных стержней как класса АIII так и класса АI ниже показателей контрольного состава на портландцементе на 9,37-20,5 %. Определяется расходом вяжущего (молотым шлаком) и видом щелочного активатора. Остальные ШЩБ имеют выше прочность на выдергивание арматурных стержней класса АIII так и класса АI на 22,58 – 57,63 %.

В исследовании сравнивалась прочность сцепления ШЩБ с различными пропорциями $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \times n \text{H}_2\text{O}$ в водном растворе. Результаты показывают, что более высокое соотношение $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \times n \text{H}_2\text{O}$ к NaOH приводит к большей прочности сцепления (табл.1).

Выводы

1. Установлено, что молотые до удельной поверхности $2850 \text{ см}^2/\text{г}$ доменные гранулированные шлаки могут использоваться в качестве шлакощелочного вяжущего.

2. Высокие физико-механические свойства ШЩБ позволяют получать армированные конструкции характеризующиеся высокой трещиностойкостью.

3. Высокая прочность сцепления ШЩБ с арматурными стержнями обеспечивает меньшую длину их анкеровки, по сравнению с рекомендациями для бетонов на основе портландцемента.

4. Необходимо произвести оценку влияния глубины анкеровки различной арматуры в ШЩБ по отношению к бетонам на основе портландцемента.

Литература

1. Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications. Saint-Quentin: Institut Gopolymure, 2015. 617 p.



2. Shen D.H., Wu C.M.J., Du C. *Construction and Building Materials*, 2009. № 23. Pp. 453–461.
 3. Adam A.A., Molyneaux T.C.K., Patnaikuni I., Law D.W. *ISEC*, 2009. № 5. Pp. 563-568.
 4. Шляхова Е.А., Акопян А.Ф., Акопян В.Ф. Применение метода рентгенофазового анализа для изучения свойств модифицированного шлакощелочного вяжущего // *Инженерный вестник Дона*, 2012, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1395.
 5. Korneeva E.V., Berdov G.I., Sozinov S.A. *Construction and Geotechnics*, 2020. № 11 (1). Pp. 102-114.
 6. Романенко И.И., Романенко М.И., Петровнина И.Н., Фадин А.И., Горохова А.А. Пробуждение гидравлической активности граншлаков химическими веществами // *Инженерный вестник Дона*, 2020, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6677.
 7. Bakharev T. *Cement and Concrete Research*, 2006. №. 6. Pp. 1134-1147.
 8. Sarker P.K., Kelly S., Yao Z. *Materials & Design*, 2014. № 64. Pp. 584-592.
 9. Ma Q., Guo R., Zhao Z., Lin Z., He K. *Construction and Building Materials*, 2015. № 9. Pp. 371-383.
 10. Cheng T.W., Chiu J.P. *Minerals Engineering*, 2003, № 16 (3). Pp. 205-210.
 11. Романенко И.И. Модифицированные шлакощелочные бетоны с добавками побочных продуктов биосинтеза: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Саратов, 1993. 145 с.
 12. Shi C., Krivenko P.V., Roy D.M. *Alkali-Activated Cements and Concretes*, 2006, № 4. Pp. 663-686.
 13. Puertas F., Fernandez-Jimenez A., Blanco-Varela M.T. *Cement and Concrete Research*. 2004, № 34 (1). Pp. 139-148.
-



14. Рахимова Н.Р. Шлакощелочные вяжущие и бетоны с силикатными и алюмосиликатными минеральными добавками: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. Казань, 2010. 502 с.

15. Романенко И.И., Пилясов Б.В. Материал на основе металлургических шлаков для укрепления дорожных оснований // Строительные материалы, 2008. № 12. С. 28-29.

16. Shen D.H., Wu C.M.J., Du C. Construction and Building Materials, 2009. № 23. Pp. 453–461.

References

1. Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications. Saint-Quentin: Institut Gopolymure, 2015. 617 p.

2. Shen D.H., Wu C.M.J., Du C. Construction and Building Materials, 2009. № 23. Pp. 453–461.

3. Adam A.A., Molyneaux T.C.K., Patnaikuni I., Law D.W. ISEC, 2009. № 5. Pp. 563-568.

4. Shlyakhova YE.A., Akopyan A.F., Akopyan V.F. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1395.

5. Korneeva E.V., Berdov G.I., Sozinov S.A. Construction and Geotechnics, 2020. № 11 (1). Pp. 102-114.

6. Romanenko I.I., Romanenko M.I., Petrovnina I.N., Fadin A.I., Gorokhova A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6677.

7. Bakharev T. Cement and Concrete Research, 2006. №. 6. Pp. 1134-1147.

8. Sarker P.K., Kelly S., Yao Z. Materials & Design, 2014. № 64. Pp. 584-592.

9. Ma Q., Guo R., Zhao Z., Lin Z., He K. Construction and Building Materials, 2015. № 9. Pp. 371-383.



10. Cheng T.W., Chiu J.P. Minerals Engineering, 2003, № 16 (3). Pp. 205-210.
11. Romanenko I.I. Modifitsirovannyye shlakoshchelochnyye betony s dobavkami pobochnykh produktov biosinteza [Modified slag-alkaline concretes with additives of biosynthesis by-products]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05. Saratov, 1993. 145 p.
12. Shi C., Krivenko P.V., Roy D.M. Alkali-Activated Cements and Concretes, 2006, № 4. Pp. 663-686.
13. Puertas F., Fernandez-Jimenez A., Blanco-Varela M.T. Cement and Concrete Research. 2004, № 34 (1). Pp. 139-148.
14. Rakhimova N.R. Shlakoshchelochnyye vyazhushchiye i betony s silikatnymi i alyumosilikatnymi mineral'nymi dobavkami [Slag-alkaline binders and concretes with silicate and aluminosilicate mineral additives]: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.05. Kazan', 2010. 502 p.
15. Romanenko I.I., Pilyasov B.V. Stroitel'nyye materialy, 2008. № 12. Pp. 28-29.
16. Shen D.H., Wu C.M.J., Du C. Construction and Building Materials, 2009. № 23. Pp. 453–461.

Дата поступления: 10.07.2024

Дата публикации: 25.08.2024