

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА ЖАРСТОЙКИХ БЕТОНОВ НА ШЛАКОЩЕЛОЧНОМ ВЯЖУЩЕМ

Р.Р. Ахтямов

Уральский научно-исследовательский институт строительных материалов (ООО «УралНИИСтром»), г. Челябинск, Россия

Данная исследовательская работа посвящена изучению влияния минеральных добавок на свойства жаростойких мелкозернистых шлакощелочных бетонов с шамотным заполнителем. В качестве шлакощелочного вяжущего для проведения исследований использован самораспадающийся феррохромовый шлак, затворенный водным раствором NaOH. Минеральные добавки различной природы и химического состава вводили в количестве 10 и 20 % взамен части самораспадающегося феррохромового шлака. В результате работы выявлено, что применение добавок каолина и реактивного глинозема позволяет получить жаростойкие бетоны с высокой остаточной прочностью и термостойкостью. Кроме того, каолин способствует повышению прочности бетона после тепловой обработки, а применение реактивного глинозема позволяет получить жаростойкий бетон с классом по предельно допустимой температуре применения И13. В связи с этим перспективной представляется разработка комплексного модификатора для шлакощелочных жаростойких бетонов на основе каолина и реактивного глинозема. Также в дальнейшем для выявления механизмов действия минеральных добавок необходимо проведение исследований фазового состава и структуры модифицированного шлакощелочного камня с помощью физико-химических методов анализа.

Ключевые слова: жаростойкий бетон, шлакощелочное вяжущее, самораспадающийся феррохромовый шлак, минеральные добавки, каолин, метакаолин, реактивный глинозем.

Введение

Современный этап промышленного производства характеризуется активным поиском эффективных решений, позволяющих получать продукцию высокого качества в короткие сроки при экономии материальных, трудовых и энергетических ресурсов, что обеспечивает снижение себестоимости продукции. Использование высокотемпературных тепловых агрегатов, обусловленное необходимостью глубокой переработки сырьевых материалов или придания продукции специальных свойств, является в настоящее время неотъемлемой частью технологического процесса во многих ведущих отраслях промышленности: в черной и цветной металлургии, нефтехимической промышленности, промышленности строительных материалов и других. Для эффективной и длительной работы таких тепловых агрегатов, как доменные, трубчатые, тоннельные, вращающиеся, кольцевые и другие печи, необходимо обеспечивать защиту их конструктивных элементов и вспомогательного оборудования, подвергающегося нагреву в процессе использования. При этом в определенных случаях важно обеспечить не только высокую температуру применения футеровочных материалов, но и их высокую термостойкость – то есть длительную работоспособность в условиях циклических перепадов температур, что является достаточно сложной научно-технической задачей [1–3]. Проблема высокой термостойкости в частности очень актуальна для футеровок обжиговых вагоне-

ток, массово применяемых при производстве керамических строительных материалов. Широко распространенные штучные обжиговые огнеупоры имеют зачастую нецелесообразно высокую для этой области использования температуру применения, но характеризуются низкой термостойкостью, что вызывает необходимость постоянных затрат на ремонт и замену футеровок. В свете этого разработка жаростойких бетонов – безобжиговых материалов из недефицитного сырья, обладающих высокой термостойкостью и характеризующихся достаточной температурой применения, – приобретает особую актуальность.

Уральским научно-исследовательским институтом строительных материалов совместно с кафедрой строительных материалов и изделий Южно-Уральского государственного университета традиционно проводятся многолетние исследования по разработке и совершенствованию технологии жаростойких бетонов при широком использовании техногенного сырья и отходов промышленности, таких как шлаки черной и цветной металлургии, а также шлаки от выплавки ферросплавов [4–6]. В настоящее время активно ведется разработка жаростойких бетонов с использованием шлакощелочного вяжущего, получаемого на основе самораспадающегося феррохромового шлака (ФХШ) – многотоннажного отхода промышленности от выплавки низкоуглеродистого феррохрома на Челябинском электрометаллургическом комбинате (АО «ЧЭМК»)

Действующая классификация жаростойких бетонов приведена в ГОСТ 21090–2019 «Бетоны жаростойкие. Технические условия», а в СП 27.13330.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур» указаны традиционные составы жаростойких бетонов и обозначены области их применения в зависимости от температуры в рабочем пространстве теплового агрегата. Однако следует отметить, что такой вид вяжущего, как шлакощелочное вяжущее на основе ФХШ, действующей классификацией не предусматривается.

Известны исследования по разработке вяжущих на основе ФХШ [7], позволяющих получить жаростойкие бетоны с высокой термостойкостью, но при этом исследователями не конкретизируется механизм работы бетонов на таких вяжущих в условиях высоких температур, а также не приводится минералогический и химический состав получаемого вяжущего, что осложняет анализ и затрудняет оценку воспроизводимости результатов их работы. Есть основания полагать, что данные работы велись на ФХШ с химическим и, возможно, минералогическим составом, отличающимся от современного. Так, в источнике [8] приводится следующий химический состав ФХШ производства АО «ЧЭМК»: SiO_2 – 16–29 %, CaO – 48–51 %, Al_2O_3 – 5–8 %, MgO – 12–16 %, Cr_2O_3 – 4,5–5,5 %. По данным лаборатории завода АО «ЧЭМК», химический состав ФХШ начиная с 2005 года по настоящее время меняется в следующих пределах: SiO_2 – 20–32 %, CaO – 39–44 %, Al_2O_3 – 8–13 %, MgO – 15–17 %, Cr_2O_3 – 5–6 %. При разработке шлакощелочного вяжущего на основе ФХШ в период с 2005 г подтвердить приведенные в работе [7] результаты не удалось, что может быть вызвано изменением состава ФХШ с момента проведения работы. В Уральском научно-исследовательском институте строительных материалов на шлакощелочном вяжущем на основе ФХШ свежего передела были разработаны жаростойкие бетоны с высокой термостойкостью и температурой применения с использованием смешанных заполнителей и модифицирующих добавок [9].

Известно, что на термостойкость жаростойких бетонов оказывают влияние многие факторы. К основным факторам относятся: фазовый состав цементного камня и заполнителей, изменения фазового состава при нагревании (дегидратация, декарбонизация, полиморфные превращения, синтез новых фаз с изменением объема системы); структура цементного камня (хрупкая крупнокристаллическая структура больше подвержена трещинообразованию и разрушению под воздействием перепада температур); разность коэффициентов линейного термического расширения (КЛТР) заполнителей и цементного камня (разные величины деформации заполнителя и цементного камня при нагреве могут привести к возникновению напря-

жений и разрушению жаростойкого бетона). Также на термостойкость жаростойких бетонов влияют содержание и наибольшая крупность заполнителя, теплопроводность заполнителя и цементного камня, прочность бетона на растяжение [10–13].

Шлакощелочные вяжущие (ШЩВ) – сложные системы, в которых в зависимости от вида применяемого шлака и щелочного затворителя, условий и сроков твердения может образовываться целый ряд гидратных фаз, в том числе гидросиликаты и гидроалюминаты щелочеземельных металлов разной основности и степени закристаллизованности, щелочные гидросиликаты, гидрогеленит, цеолитоподобные гидроалюмосиликаты щелочных и щелочеземельных металлов и другие [14, 15]. При этом с позиций обеспечения большей термостойкости будут предпочтительны фазы менее закристаллизованной структуры, способные релаксировать напряжения, возникающие в образце при нагревании, а также плавно дегидратирующие в широком интервале температур без значительных сбросов прочности. К таким гидратным фазам можно отнести цеолитоподобные соединения – каркасные алюмосиликаты, имеющие в своей структуре на уровне кристаллической решетки полости, занятые молекулами воды и катионами щелочных и щелочеземельных металлов, способные к обратимой дегидратации без значительного разрушения кристаллической решетки при нагреве [16]. Введение минеральных добавок различного состава может существенно повлиять как на фазовый состав и структуру образующегося шлакощелочного камня, так и на его коэффициент линейного термического расширения, что, в свою очередь, окажет влияние на термостойкость жаростойкого бетона.

Таким образом, следующим этапом работы по улучшению свойств шлакощелочного вяжущего с использованием ФХШ и жаростойких бетонов на его основе стал поиск эффективных минеральных добавок для направленного модифицирования вяжущего и получения термостойкого цементного камня и бетона на его основе.

Материалы и методы исследования

Для проведения настоящих исследований использовали ранее разработанное шлакощелочное вяжущее на основе ФХШ марки «Белит» (АО «Челябинский электрометаллургический комбинат») и водного раствора NaOH марки «Натр технический чешуируванный» с содержанием NaOH не менее 98,7 % (АО «Башкирская содовая компания»).

В высокоскоростном лабораторном смесителе интенсивного действия готовили мелкозернистую бетонную смесь на основе ФХШ и шамотного заполнителя наибольшей крупностью 5 мм с зерновым составом, соответствующим требованиям ГОСТ 20910-2019. Соотношение «(ФХШ + минеральная добавка) : заполнитель» было принято равным 1:2,5 по массе. Для приготовления шлако-

щелочного вяжущего использовали раствор NaOH с плотностью 1300 кг/м³ в количестве 10 % в пересчете на сухое вещество от суммарной массы ФХШ и минеральной добавки. Дополнительно в смесь вводили воду для обеспечения удобоукладываемости Ж1.

В качестве добавок применяли: метакаолин МКЖЛ (ООО «Пласт-Рифей»), каолин сорта КЖ-1 (ООО «Пласт-Рифей»), молотый шамотный наполнитель марки ЗШБ (ООО «Огнеупор»), молотые шлаки алюминотермического производства Ключевского завода ферросплавов (АО «УК «РосСпецСплав – Группа МидлОрал»): шлак от выплавки металлического хрома (ШМХ) и шлак от выплавки ферротитана (ШФТ), реактивный глинозем ГРТ (АО «Боровичский комбинат огнеупоров»). Все минеральные добавки вводили в состав вяжущего взамен части ФХШ в количестве 10 и 20 %.

Удобоукладываемость бетонной смеси определяли по ГОСТ 10181–2014, испытание свойств жаростойкого бетона проводили по ГОСТ 20910–2019.

Твердение образцов проходило в металлических формах, плотно закрытых крышками, при тепловой обработке по следующему экспериментально подобранному режиму: предварительная выдержка при 20 °С в течение 2 часов, подъем температуры со скоростью 20 °С/час, изотермическая выдержка в течение 4 часов при 80 °С, подъем температуры со скоростью 20 °С/час, изотермическая выдержка в течение 4 часов при 120 °С, охлаждение в течение 4 часов. Перед проведением испытаний образцы сушили согласно требованиям ГОСТ 20910–2019.

Химический состав используемых в работе материалов принят согласно паспортам качества на данные материалы. Истинную плотность и

удельную поверхность тонкодисперсных материалов определяли по ГОСТ 310.2-76.

Исследовательская часть

В табл. 1 приведены истинная плотность и удельная поверхность ФХШ и применяемых в работе минеральных добавок, в табл. 2 показан их химический состав.

Химический состав минеральной части вяжущего в исследуемых бетонах с учетом введенных в вяжущее добавок приведен в табл. 3, без учета содержания щелочи, вводимой сверх минеральной части вяжущего.

Данные табл. 3 показывают, что исследуемые вяжущие системы значительно отличаются по химическому составу, что может обуславливать существенные отличия в составе образующихся гидратных фаз. В системе с повышенным содержанием силикатов кальция (без добавок) более вероятно формирование структуры преимущественно из С-S-H-фаз, состав и основность которых будут определяться отношением CaO/SiO₂.

Результаты влияния минеральных добавок на водовяжущее отношение в бетонной смеси равной удобоукладываемости, а также на свойства жаростойких бетонов приведены на рис. 1–7.

Полученные данные показали, что введение таких минеральных добавок как МКЖЛ и КЖ-1 приводит к повышению водовяжущего отношения для получения бетонной смеси равной удобоукладываемости, что, вероятно, связано с их высокой удельной поверхностью. Добавка ГРТ, несмотря на значительную величину удельной поверхности, не увеличивает и даже несколько снижает водовяжущее отношение. Это может быть вызвано улучшением зернового состава вяжущего при введении ГРТ за счет заполнения межзерновой

Таблица 1

Истинная плотность и удельная поверхность ФХШ и минеральных добавок

Материал	Истинная плотность, г/см ³	Удельная поверхность, см ² /г
ФХШ	3,05	3134
МКЖЛ	2,59	16146
КЖ-1	2,62	15148
ЗШБ	2,58	3202
ГРТ	3,93	7562
ШМХ	3,39	3052
ШФТ	3,24	3170

Таблица 2

Химический состав ФХШ и минеральных добавок

Материал	Содержание оксидов, %					
	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃
ФХШ	11,12	42,40	24,10	2,01	14,92	5,33
МКЖЛ	42,51	0,15	53,50	0,60	–	–
КЖ-1	35,06	–	49,17	1,69	–	–
ЗШБ	34,20	0	57,33	3,21	2,35	–
ГРТ	99,90	–	–	–	–	–
ШМХ	78,44	8,79	0,52	0,50	2,53	8,54
ШФТ	57,30	18,31	0,52	0,50	4,51	–

Химический состав минеральной части вяжущего в исследуемых бетонах

№ сост.	Вид и кол-во добавки	Содержание оксидов, %					CaO/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
		Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO		
1	Без добавок	11,12	42,4	24,1	2,01	14,92	1,76	2,17
2	10 % МКЖЛ	14,26	38,18	27,04	1,87	13,43	1,41	1,90
3	20 % МКЖЛ	17,40	33,95	29,98	1,73	11,94	1,13	1,72
4	10 % КЖ-1	13,51	38,16	26,61	1,98	13,43	1,43	1,97
5	20 % КЖ-1	15,91	33,92	29,11	1,95	11,94	1,17	1,83
6	10 % ЗШБ	13,43	38,16	27,42	2,13	13,66	1,39	2,04
7	20 % ЗШБ	15,74	33,92	30,75	2,25	12,41	1,10	1,95
8	10 % ГРТ	20,00	38,16	21,69	1,81	13,43	1,76	1,08
9	20 % ГРТ	28,88	33,92	19,28	1,61	11,94	1,76	0,67
10	10 % ШМХ	17,85	39,04	21,74	1,86	13,68	1,80	1,22
11	20 % ШМХ	24,58	35,68	19,38	1,71	12,44	1,84	0,79
12	10 % ШФТ	15,74	39,99	21,74	1,86	13,88	1,84	1,38
13	20 % ШФТ	20,36	37,58	19,38	1,71	12,84	1,94	0,95

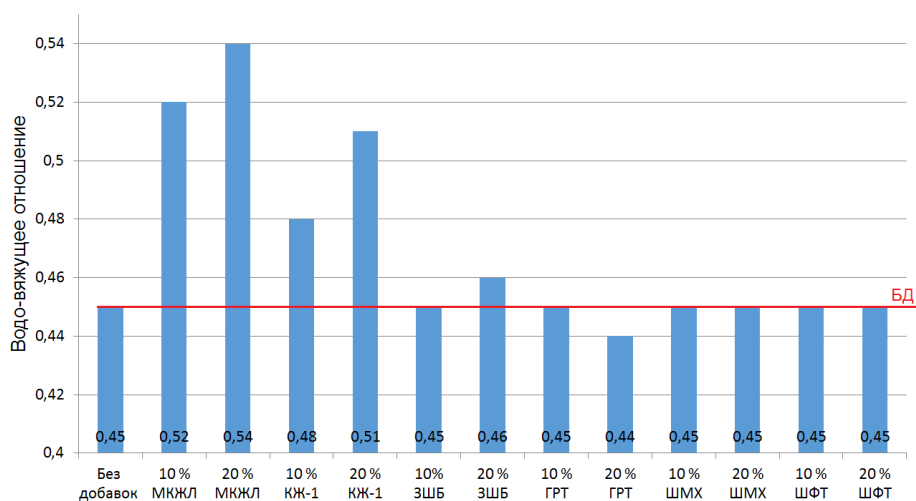


Рис. 1. Влияние минеральных добавок на водовяжущее отношение

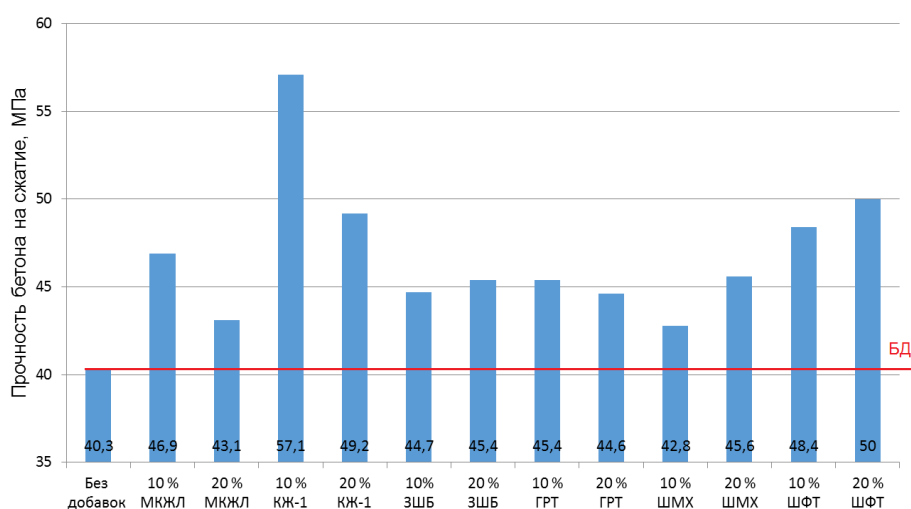


Рис. 2. Влияние минеральных добавок на прочность на сжатие (МПа) жаростойких шлакощелочных бетонов после тепловой обработки и сушки

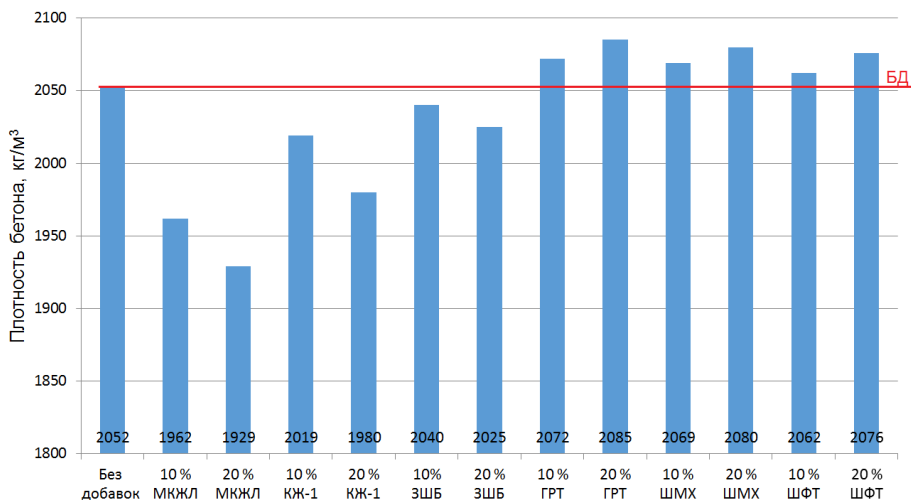


Рис. 3. Влияние минеральных добавок на плотность (кг/м³) жаростойких шлакощелочных бетонов после тепловой обработки и сушки

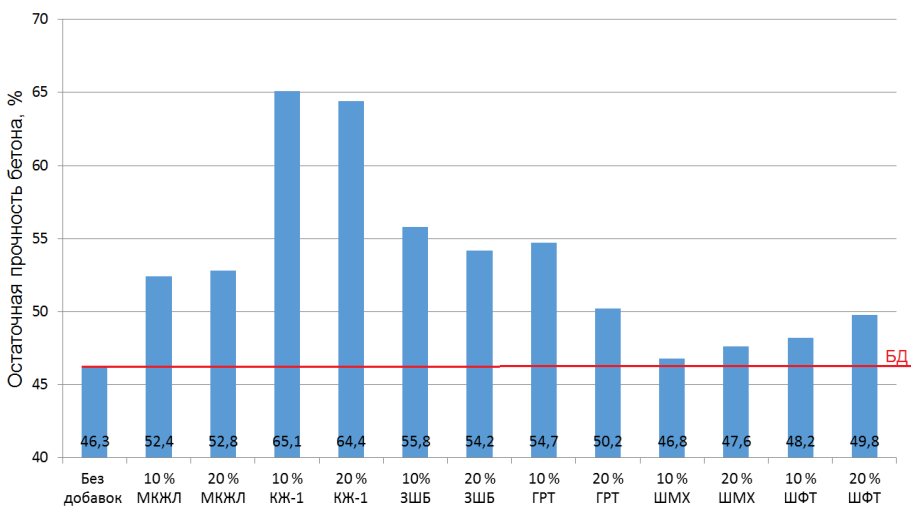


Рис. 4. Влияние минеральных добавок на остаточную прочность (%) жаростойких шлакощелочных бетонов

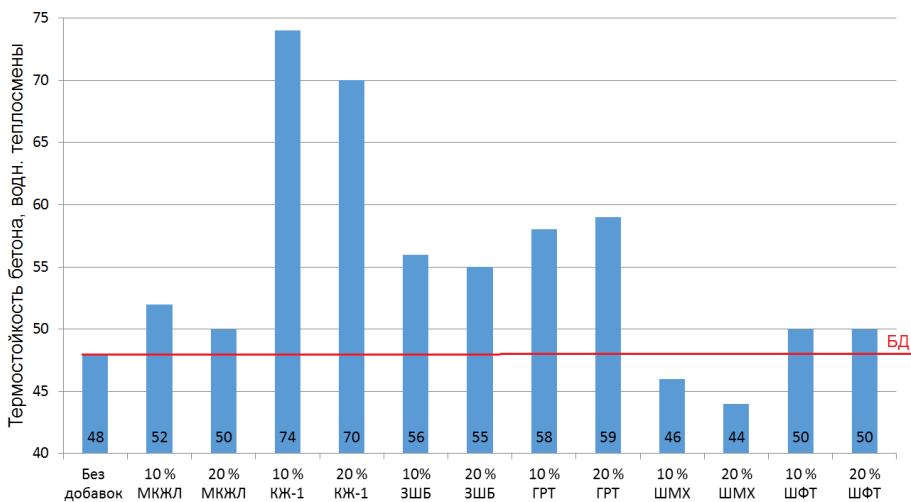


Рис. 5. Влияние минеральных добавок на термостойкость (водные теплосмены) жаростойких шлакощелочных бетонов

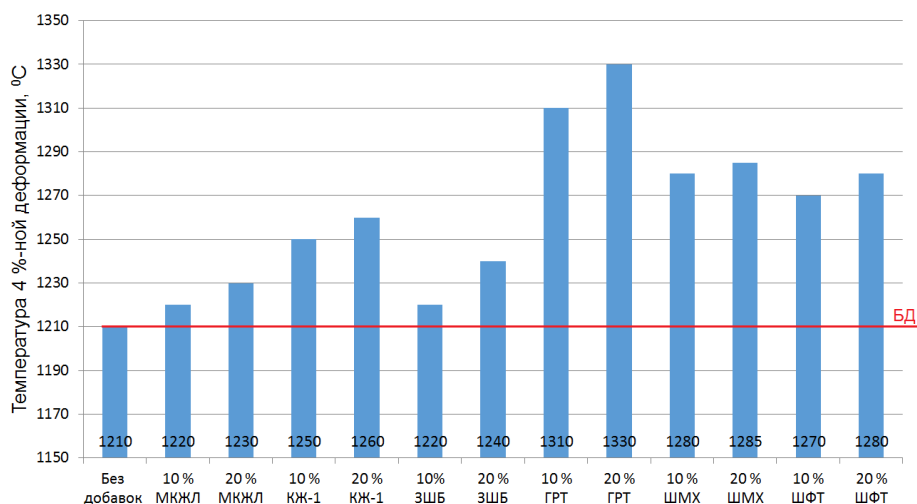


Рис. 6. Влияние минеральных добавок на температуру (°C) 4 %-ной деформации жаростойких шлакощелочных бетонов

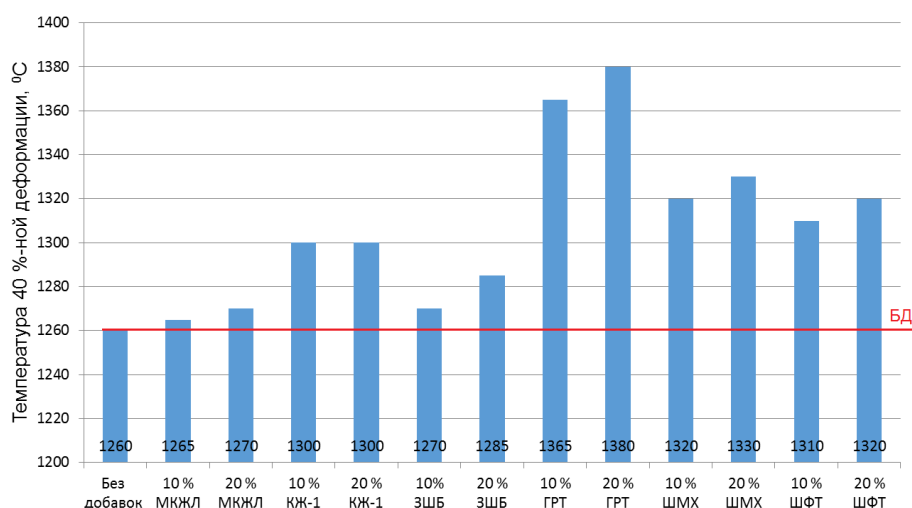


Рис. 7. Влияние минеральных добавок на температуру (°C) 40 %-ной деформации жаростойких шлакощелочных бетонов

пустотности ФХШ частицами ГРТ, имеющими меньший размер, округлую форму и большую истинную плотность. ЗШБ, ШМХ и ШФТ не оказывают значительного влияния на водовязущее отношение в бетонной смеси при использовании их в качестве добавок-модификаторов.

Плотность жаростойких мелкозернистых бетонов увеличивается при введении высокоглиноземистых добавок, при этом максимальной плотностью характеризуется бетон с добавкой ГРТ. Добавки МКЖЛ, КЖ-1 и ЗШБ снижают плотность бетона, что может быть связано как с увеличением водовязущего отношения в бетонной смеси, так и с меньшей истинной плотностью самих добавок по сравнению с ФХШ.

В жаростойких бетонах с МКЖЛ, несмотря на увеличение водовязущего отношения, наблюдается повышение прочности на сжатие по сравнению с вяжущим без минеральных добавок, что свиде-

тельствует об активном участии добавки метакаолина в процессах твердения шлакощелочного вяжущего. Добавка ЗШБ также позволяет несколько повысить прочность бетона на сжатие. Однако наибольшего положительного эффекта позволяет достичь применение добавки КЖ-1 в дозировке 10%: прочность бетона на сжатие после тепловой обработки и сушки увеличивается на 41,7%, что может быть обусловлено формированием в структуре цементного камня прочных стабильных каркасных гидроалюмосиликатов – цеолитных фаз, что также способствует существенному повышению остаточной прочности и термостойкости жаростойких шлакощелочных бетонов.

Добавка ГРТ не только не снижает прочность бетона на сжатие, но и несколько увеличивает ее, хотя реактивный глинозем, согласно литературным данным, является инертным при выбранном режиме тепловой обработки и не вступает в хими-

ческие реакции при температурах до 800 °С. Такой эффект может быть связан с уплотнением цементного камня прочными частицами добавки, заполняющими пустотность между частицами ФХШ, армируя и создавая благоприятные стесненные условия для протекания процессов фазообразования в твердеющей шлакощелочной системе.

Добавки ШМХ и ШФТ в дозировке 20 % позволяют повысить прочность жаростойких шлакощелочных бетонов на 13 и 24 % соответственно, что может быть связано с их реакционной способностью по отношению к щелочному затворителю в условиях тепловой обработки, при этом шлак ферротитана более активен, чем шлак металлического хрома.

Полученные данные показали, что максимально повысить остаточную прочность и термостойкость позволяет добавка каолина КЖ-1. При введении 10 % КЖ-1 остаточная прочность повышается на 40,6 %, термостойкость возрастает на 26 циклов, однако при 20 % положительный эффект добавки снижается, что может быть вызвано избыточным каолином, остающимся в системе в свободном состоянии. Добавки метакаолина и ЗШБ также позволили несколько увеличить остаточную прочность и термостойкость жаростойкого шлакощелочного бетона, однако показали себя менее эффективными, чем КЖ-1. Это может объясняться высокой скоростью гидролиза метакаолина, имеющего аморфизированную дефектную структуру, в присутствии щелочи с быстрым образованием алюмо- и кремнезелей, которые могут быстро осаждаться зольями щелочеземельных металлов, в первую очередь, кальция. Это может привести к первоначальному формированию в таких условиях метастабильных гидроалюминатных фаз и гидрогеленита, склонных к перекристаллизации при нагреве и циклическом изменении температуры [16, 17], тогда как при обработке каолина раствором щелочи изначально должны формироваться цеолитоподобные структуры [18]. Шамот представляет собой обожженную огнеупорную глину, вероятно, содержащую какую-то часть аморфного дегидратированного каолинита – метакаолина, что также может способствовать формированию гидроалюминатных фаз и гидрогеленита в продуктах гидратации.

Введение ГРТ способствует увеличению остаточной прочности и термостойкости жаростойких шлакощелочных бетонов, что может быть связано с микроармированием цементного камня прочными огнеупорными частицами добавки, а также с началом протекания физико-химических реакций в твердой фазе с формированием новых высокотемпературных фаз, повышающих прочность дегидратированного цементного камня. Это также подтверждает значительное увеличение температур 4 %-ной и 40 %-ной деформации на 100–120 °С по сравнению с бетоном без минеральных добавок,

что позволит повысить класс бетона по температуре применения до И13.

Добавки ШМХ и ШФТ также способствуют повышению температур 4 %-ной и 40 %-ной деформации жаростойкого шлакощелочного бетона, однако класс бетона по температуре применения остается при этом в пределах И12. Добавки МКЖЛ, КЖ-1 и ЗШБ на температуры 4 %-ной и 40 %-ной деформации существенного влияния не оказывают.

Выводы

Введение минеральных добавок в состав шлакощелочного вяжущего существенно влияет на свойства жаростойкого бетона, что обусловлено сложными физико-химическими процессами, протекающими в твердеющей системе при затворении раствором щелочи, а также при дальнейшем обжиге.

Наиболее эффективно повысить прочность на сжатие бетонов после тепловой обработки помогает использование в качестве добавки шлака производства ферротитана ШФТ и каолина КЖ-1. Введение остальных добавок в меньшей степени влияет на прочность бетонов.

Максимальной термостойкости и остаточной прочности после обжига при 800 °С и позволяют добиться добавки КЖ-1 и ГРТ в количестве 10 %, кроме того, добавка ГРТ позволяет получить жаростойкий бетон с классом по предельно допустимой температуре применения И13.

Учитывая полученные результаты, целесообразным будет являться разработка комплексного модификатора на основе КЖ-1 и ГРТ, позволяющего сформировать структуру шлакощелочного камня из прочных, термостабильных фаз, а также обеспечить близость значений КЛТР шлакощелочного камня и применяемых заполнителей.

Также, исходя из результатов проведенных ранее исследований, подтвержденных вышеприведенными данными, перспективным будет являться применение ШМХ и/или ШФТ в качестве активного заполнителя в жаростойких бетонах.

Для выявления механизмов действия минеральных добавок необходимо проведение исследований фазового состава и структуры модифицированного шлакощелочного камня с помощью комплекса физико-химических методов исследования, таких как дифференциально-термический и рентгенофазовый анализ, растровая электронная микроскопия.

Литература

1. Кащеев, И.Д. *Химическая технология огнеупоров: учебное пособие* / И.Д. Кащеев, К.К. Стрелов, П.С. Мамыкин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 752 с.
2. Тотурбиев, Б.Д. *Строительные материалы на основе силикат-натриевых композиций* / Б.Д. Тотурбиев. – М.: Стройиздат, 1988. – 205 с.

3. Фомичев, Н.А. Жаростойкие бетоны на основе металлургических шлаков / Н.А. Фомичев. – М.: Стройиздат, 1972. – 129 с.
4. Ахтямов, Р.Р. Жаростойкий бетон повышенной термостойкости на шлакощелочном вяжущем / Р.Р. Ахтямов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. – № 3. – С. 43–46.
5. Ахтямов, Р.Р. Жаростойкое шлакощелочное вяжущее на основе шлака алюминотермической выплавки металлического хрома / Р.Р. Ахтямов, А.Н. Абызов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2015. – № 9. – С. 30–34.
6. Akhtayamov, R.R. Microstructure study of lime-slag cement stone after thermal treatment at various temperatures / R.R. Akhtayamov, B.Ya. Trofimov, R.A. Zhivtsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – vol. 451. – 012014.
7. Пат. 2284305 Российская Федерация, МПК⁷ С 04 В 28/08, С 04 В 40/02, С 04 В 111/20. Способ изготовления жаростойкой бетонной смеси и способ изготовления изделий из жаростойкой бетонной смеси / В.А. Сырых, О.А. Завьялов; заявители и патентообладатели В.А. Сырых, О.А. Завьялов. – № 2005107159/03; заявл. 14.03.05; опубл. 27.09.06, Бюл. № 27. – 5 с.
8. Переработка и утилизация промышленных отходов Челябинской области / под общ. ред. И.П. Добровольского и И.Я. Чернявского. – Челябинск: Челябинская межрайонная типография, 2000. – 255 с.
9. Пат. 2437854 Российская Федерация, МПК⁷ С 04 В 28/08, С 04 В 40/02. Способ изготовления жаростойкой бетонной смеси на шлакощелочном вяжущем и способ изготовления изделий из жаростойкой бетонной смеси / Р.Р. Ахтямов, Б.Я. Трофимов; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. – № 2010122087/03; заявл. 31.05.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. – 6 с.
10. Горчаков, Г.И. Коэффициенты температурного расширения и температурные деформации строительных материалов / Г.И. Горчаков, И.И. Лифанов, Л.И. Терехин. – М.: Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1968. – 164 с.
11. Гречка, Ю.Л. Влияние вида вяжущего на деформации жаростойкого бетона / Ю.Л. Гречка, А.Ф. Рыбьянец, В.Н. Пак // Жаростойкие материалы и бетоны: сборник научных трудов. – Челябинск: УРАЛНИИСТРОМПРОЕКТ, 1978. – С. 26–31.
12. Кондрашенков, А.А. К вопросу снижения прочности высокоглиноземистого цементного камня при нагревании / А.А. Кондрашенков, Е.В. Зализовский, Г.И. Залдат // Строительные материалы на основе вермикулита, шлаков и зол: сборник научных трудов. – Челябинск: УралНИИСтромПроект, 1975. – С. 133–138.
13. Соков, В.Н. Создание огнеупорных бетонов и теплоизоляционных материалов с повышенной термостойкостью: монография / В.Н. Соков. – М.: МГСУ, 2015. – 288 с.
14. Глуховский, В.Д. Шлакощелочные цементы и бетоны / В.Д. Глуховский, В.А. Пахомов. – Киев: Будівельник, 1978. – 184 с.
15. Щелочные вяжущие и мелкозернистые бетоны на их основе / под общ. ред. В.Д. Глуховского. – Ташкент: Узбекистан, 1980. – 483 с.
16. Овчаренко, Г.И. Цеолиты в строительных материалах / Г.И. Овчаренко, В.Л. Свиридов, Л.К. Казанцева. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 320 с.
17. Метакралин в будівельних розчинах і бетонах / Л.Й. Дворкін, Н.В. Лушнікова, Р.Ф. Рунова, В.В. Троян – Київ: Видавництво КНУБіА, 2007. – 215 с.
18. Ерошкина, Н.А. Геополимерные строительные материалы на основе промышленных отходов / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин. – Пенза: Изд-во ПГАУС, 2004. – 128 с.

Ахтямов Руслан Рашидович, старший научный сотрудник, Уральский научно-исследовательский институт строительных материалов (ООО «УралНИИСтром»), г. Челябинск, 351@7359808

Поступила в редакцию 2 марта 2020 г.

STUDYING THE EFFECT OF MINERAL ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT CONCRETE ON SLAG-LIME BINDER

R.R. Akhtyamov, 351@7359808

Ural Research Institute of Building Materials (ООО "UralNIIStrom"), Chelyabinsk, Russian Federation

This research work is devoted to the study of the effect of mineral additives on the properties of heat-resistant fine-grained slag-lime concrete with fire clay aggregate. To conduct the study, self-decaying ferrochrome slag, mixed with the NaOH water solution, is used as a slag-lime binder. Mineral additives of different nature and chemical composition were introduced in the amount of 10 % and 20 % instead of self-disintegrating ferrochrome slag. As a result of the work it was revealed, that the use of the kaolin and reactive alumina additives allows to obtain heat-resistant concrete with high residual strength and heat resistance. Besides that, kaolin provides an increase of the concrete durability after heat treatment, and the use of reactive alumina allows to receive heat-resistant concrete with the И13 class of the maximum permissible temperature of application. In this regard, the development of kaolin- and reactive-alumina-based complex modifier for slag-lime heat-resistant concrete seems to be relevant. Also, to identify the action mechanisms of mineral additives in the future, it is necessary to conduct research of the phase composition and structure of the modified slag-lime stone using physical and chemical methods of analysis.

Keywords: heat-resistant concrete, slag-lime binder, self-disintegrating ferrochrome slag, mineral additives, kaolin, metakaolin, reactive alumina.

References

1. Kashcheyev I.D., Strelou K.K., Mamykin P.S. *Khimicheskaya tekhnologiya ogneuporov: uchebnoye posobiye* [Chemical Technology of Refractories: Textbook]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2007. 752 p.
2. Toturbiyev B.D. *Stroitel'nyye materialy na osnove silikat-natriyevykh kompozitsiy* [Building Materials Based on Silicate-Sodium Compositions]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 205 p.
3. Fomichev N.A. *Zharostoykiye betony na osnove metallurgicheskikh shlakov* [Heat-Resistant Concretes Based on Metallurgical Slags]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972. 129 p.
4. Akhtyamov R.R. [Heat-Resistant Concrete with Increased Heat Resistance on a Slag-Alkali Binder]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics], 2010, no. 3, pp. 43–46. (in Russ.)
5. Akhtyamov R.R., Abyzov A.N. [Heat Resistant Slag-Alkali Binder Based on Slag of Aluminum-Thermal Smelting of Metallic Chromium]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics], 2015, no. 9, pp. 30–34. (in Russ.)
6. Akhtyamov R.R., Trofimov B.Ya., Zhivtsova R.A. [Microstructure Study of Lime-Slag Cement Stone after Thermal Treatment at Various Temperatures]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 451, 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012014.
7. Syrykh V.A., Zav'yalov O.A. *Sposob izgotovleniya zharostoykoy betonnoy smesi i sposob izgotovleniya izdeliy iz zharostoykoy betonnoy smesi* [A Method of Manufacturing a Heat-Resistant Concrete Mixture and a Method of Manufacturing Products from a Heat-Resistant Concrete Mixture]. Patent RF 2284305, no. 2005107159/03; decl. 14.03.05; publ. 27.09.06, Bul. no. 27. 5 p.
8. Dobrovolskogo I.P. (Ed.) *Pererabotka i utilizatsiya promyshlennykh otkhodov Chelyabinskoy oblasti* [Recycling and Disposal of Industrial Waste from the Chelyabinsk Region]. Chelyabinsk, Chelyabinskaya mezhrayonnaya tipografiya Publ., 2000. 255 p.
9. Akhtyamov R.R., Trofimov B.Ya. *Sposob izgotovleniya zharostoykoy betonnoy smesi na shlakoshchelochnom vyazhushchem i sposob izgotovleniya izdeliy iz zharostoykoy betonnoy smesi* [A Method of Manufacturing a Heat-Resistant Concrete Mixture on a Slag-Alkali Binder and a Method of Manufacturing Products from Heat-Resistant Concrete]. Pat. RF 2437854, no. 2010122087/03; decl. 31.05.2010; publ. 27.12.2011, Bul. no. 36. 6 p.
10. Gorchakov G.I., Lifanov I.I., Terekhin L.I. *Koeffitsiyenty temperaturnogo rasshireniya i temperaturnyye deformatsii stroitel'nykh materialov* [Coefficients of Thermal Expansion and Thermal Deformation of Building Materials]. Moscow, Izd-vo Komiteta standartov, mer i izmeritel'nykh priborov pri Sovete Ministrov SSSR Publ., 1968. 164 p.

11. Grechka Yu.L., Rybyanets A.F., Pak V.N. [The Influence of the Type of Binder on the Deformation of Heat-Resistant Concrete]. *Zharostoykiye materialy i betony: sbornik nauchnykh trudov* [Heat-Resistant Materials and Concrete: A Collection of Scientific Papers]. Chelyabinsk: URALNIISTROMPROEKT Publ., 1978, pp. 26–31. (in Russ.)

12. Kondrashenkov A.A., Zalizovskiy E.V., Zaldat G.I. [On the Issue of Reducing the Strength of High-Alumina Cement Stone when Heated]. *Stroitel'nyye materialy na osnove vermikulita, shlakov i zol: sbornik nauchnykh trudov* [Building Materials Based on Vermiculite, Slag, and Evil: A Collection of Scientific Papers]. Chelyabinsk, 1975, pp. 133–138. (in Russ.)

13. Sokov V.N. *Sozdaniye ogneupornykh betonov i teploizolyatsionnykh materialov s povyshennoy termostoykost'yu: monografiya* [Creation of Refractory Concrete and Heat-Insulating Materials with Increased Heat Resistance: a Monograph]. Moscow, MGSU Publ., 2015. 288 p.

14. Glukhovskiy V.D., Pakhomov V.A. *Shlakoshchelochnyye tsementy i betony* [Slag-Alkali Cements and Concrete]. Kiyev, Budivel'nik Publ., 1978. 184 p.

15. Glukhovskiy V.D. (Ed.) *Shchelochnyye vyazhushchiye i melkozernistyye betony na ikh osnove* [Alkaline Binders and Fine-Grained Concrete on their Basis]. Tashkent, Uzbekistan, 1980. 483 p.

16. Ovcharenko G.I., Sviridov V.L., Kazantseva L.K. *Tseolity v stroitel'nykh materialakh* [Zeolites in Building Materials]. Barnaul, Izd-vo AltGTU Publ., 2000. 320 p.

17. Dvorkin L.Y., Lushnikova N.V., Runova R.F., Troyan V.V. *Metakaolin v budivel'nikh rozchinakh i betonakh* [Metakaolin in Building Mortars and Concretes]. Kiiiv, Vidavniststvo KNUBiA Publ., 2007. 215 p.

18. Eroshkina N.A., Korovkin M.O. *Geopolimernye stroitel'nye materialy na osnove promyshlennykh otkhodov* [Geopolymer construction materials based on industrial waste]. Penza, 2004. 128 p.

Received 2 March 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ахтямов, Р.Р. Исследование влияния минеральных добавок на свойства жаростойких бетонов на шлакощелочном вяжущем / Р.Р. Ахтямов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 65–74. DOI: 10.14529/build200209

FOR CITATION

Akhtyamov R.R. Studying the Effect of Mineral Additives on the Properties of Heat-Resistant Concrete on Slag-Lime Binder. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2020, vol. 20, no. 2, pp. 65–74. (in Russ.). DOI: 10.14529/build200209
