К. т. н. **К. С. Иванов**[1,2] (✉)

[1] *Институт криосферы Земли СО РАН, г. Тюмень, Россия*
[2] *ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень, Россия*

УДК 974.2.017:536.496

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛИКАТНАТРИЕВЫХ ЗАТВОРИТЕЛЕЙ НА ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ШЛАКОЩЕЛОЧНЫХ БЕТОНОВ

Приведены результаты исследования влияния жидкостекольных затворителей на основе трепела на основные свойства шлакощелочных жаростойких бетонов с применением в качестве заполнителя хвостов обогащения титаномагнетитовых руд. Проанализировано влияние трех видов затворителей шлакощелочного бетона. Остаточная прочность бетонов (после выдержки при 800 °С) превышает исходную, термостойкость бетонных образцов в зависимости от вида затворителя достигает 32 водяных теплосмен. Результаты исследований свидетельствуют о перспективах практического применения жаростойкого шлакощелочного бетона на основе жидких стекол и хвостов обогащения титаномагнетитов.

Ключевые слова: *жаростойкий бетон, шлакощелочное вяжущее, жидкое стекло, трепел.*

Жидкое стекло является продуктом многоцелевого назначения во многих отраслях экономики и производстве стекла, керамики, пеностекла, вяжущих композиций, жаростойких бетонов и т. д. В некоторых случаях гидротермальный («мокрый») способ получения жидкого стекла с применением опал-кристобалитовых пород существенно упрощает и удешевляет технологический процесс. К таким породам относят диатомит, трепел и опоку с высоким содержанием аморфных разновидностей SiO_2, что позволяет проводить прямое выщелачивание с образованием гидратированных щелочных силикатов по схеме

$$mSiO_2 \cdot nH_2O + 2NaOH = Na_2O \cdot mSiO_2 \cdot (n + 1)H_2O, \quad (1)$$

где m — силикатный модуль жидкого стекла (молярное соотношение между SiO_2 и Na_2O).

Недостатки гидротермального способа связаны с окраской готового продукта, в ряде случаев с необходимостью упаривания для достижения заданной плотности, а также отделения нерастворимого осадка. Последнее связано с содержанием в опал-кристобалитовых породах труднорастворимых примесей кварца, глинистых минералов, цеолитов и т. п., а также органики, что приводит к получению окрашенной суспензии жидкого стекла (далее суспензии). Негативно может сказываться также переход в растворимое состояние соединений Al и Fe, что приводит к застудневанию продукта. Частично этих недостатков лишены способы с применением микрокремнезема и щелочесодержащих отходов производства [1–3]. Хотя перечисленные недостатки не позволяют расширять производство жидких стекол гидротермальным способом, в ряде случаев этот способ может быть целесообразным. Например, при использовании суспензий при получении пеностеклокерамики, силикатнатриевых связующих и прочих материалов [4–6], а также во всех случаях, когда нерастворимый остаток может играть структурообразующую роль.

Одним из направлений применения суспензий может стать получение жаростойких бетонов на основе шлакощелочных вяжущих. Основой таких вяжущих являются алюмосиликатные стекла (в основном доменные шлаки и золы от сжигания угля), затворяемые растворами щелочей и жидкими стеклами. Впервые такие системы были изучены Пьюрдоном (Purdon) [7], после чего представления о них развивались В. Д. Глуховским, в результате чего эти системы были названы щелочно-щелочноземельными алюмосиликатными вяжущими, к которым также относят шлакощелочные вяжущие [8]. Наибольшую прочность такие системы проявляют при затворении жидкими стеклами с силикатным модулем 1–2. С другой стороны, жидкие стекла традиционно применяют при изготовлении различных огнеупорных композиций и жаростойких бетонов. В этой связи применение суспензий при получении шлакощелочных жаростойких бетонов представляет практический интерес.

Цель настоящей работы — исследование возможности получения шлакощелочных жаростойких бетонов с применением в качестве затворяющего реагента жидкостекольных ком-

✉
К. С. Иванов
E-mail: sillicium@bk.ru

позиций, полученных из опал-кристобалитовой породы. Силикатный модуль и концентрации SiO_2 в жидком стекле наиболее существенно влияют на свойства шлакощелочного бетона. Например, молотые доменные шлаки, затворяемые водными растворами мета- и ортосиликата натрия с концентрацией SiO_2 200–400 г/л, обладают большей прочностью по сравнению с дисиликатом [8]. Поэтому синтез суспензий с требуемыми силикатным модулем и концентрацией SiO_2 играет решающую роль в получении шлакощелочных бетонов с заданными свойствами. Обеспечение заданных параметров при получении суспензии по схеме (1) определяется содержанием в сырье активных фаз кремнезема, к которым относят опал и кристобалит. На скорость их растворения могут влиять различные факторы. Так, максимальная концентрация растворенного SiO_2 после выщелачивания диатомита Ирбитского месторождения (Свердловская обл.) достигается при использовании 2 н. раствора NaOH, массового соотношения диатомит : раствор NaOH (*S:L*), равного 1:8, и выдержки при 90 °С в течение 4 ч. Такие параметры обеспечивают выход растворенного SiO_2 45 мас. %, в то время как общее содержание SiO_2 в породе составляет 78,2 мас. %. Применение менее концентрированных растворов NaOH (1 и 1,5 н.) снижает выход SiO_2 [9]. Обработка диатомита 7,8 н. раствором NaOH при 90 °С и *S:L* = 1:4 дает максимальный выход SiO_2 через 1,5 ч [10], т. е. процесс приготовления суспензии ускоряется. Следует отметить три наиболее значимых фактора, влияющих на выщелачивание SiO_2 при 90 °С: дисперсность опал-кристобалитовой породы, концентрация раствора NaOH и соотношение *S:L*. Второй и третий факторы в наибольшей степени влияют на вязкость получаемой суспензии, т. е. на возможность ее применения для затворения бетона, а следовательно, будут иметь определенные пределы, что необходимо учитывать при приготовлении суспензии.

В результате выщелачивания опал-кристобалитовых пород сопутствующие им примеси в виде слоистых и каркасных алюмосиликатов могут вступать во взаимодействие с едкими щелочами с образованием синтетических цеолитов. Подробные сведения по синтезу цеолитов из каолина путем обработки растворами NaOH приводятся Бреком (Breck) [11]. В продуктах щелочной обработки глины зафиксировано [12] образование новой фазы в виде фожазита (искусственного цеолита). Вероятно, на синтез новых фаз в составе суспензий будут влиять также кремнекислородные анионы различной степени поликонденсации [13]. В свою очередь, цеолитоподобные новообразования суспензий имеют химическое сродство с продуктами взаимодействия алюмосиликатных стекол и щелочей, а следовательно, могут являться эффективными компонентами, выполняющими роль кристаллической затравки, что в перспективе позволит целенаправленно управлять процессами структурообразования шлакощелочных бетонов [14]. Применение шлакощелочных вяжущих при получении жаростойких бетонов может быть эффективным с точки зрения формирования в структуре бетона (при нагревании) цементной матрицы из безводных алюмосиликатных новообразований — аналогов полевошпатных минералов [8]. Благодаря этому прочность цементной матрицы после нагревания может превышать исходную, однако необходимо учитывать и то, что ТКЛР заполнителя жаростойкого бетона и цементной матрицы должны иметь близкие значения [15].

Опал-кристобалитовая порода была представлена трепелом Сухоложского месторождения (Свердловская обл.). Химический состав трепела представлен в табл. 1. Строение трепела и продуктов его выщелачивании исследовали с применением сканирующего электронного микроскопа «Jeol JSM-6510A», Япония. Фазовый состав исходных материалов и продуктов взаимодействия системы доменный гранулированный шлак (ДГШ) – силикатнатриевый затворитель изучали с помощью дифрактометра ДРОН-6, длина волны 0,179 нм, Cu K_α-излучение, Fe-фильтр. Идентификацию фаз проводили с применением базы данных American Mineralogist Crystal Structure Database. Результаты рентгенофазового анализа свидетельствуют о достаточно высокой степени аморфизации трепела ввиду наличия сильнодисперсного рефлекса в диапазоне $2\theta = 18 \div 26$ град (рис. 1, *а*). Кристаллическая фаза идентифицируется как высокотемпературный кристобалит (β-кристобалит) (см. рис. 1, *а*). Полученные при исследовании отражения для β-кристобалита согласуются с экспериментальными данными [15]. В составе трепела идентифицируется кварц с отражениями при углах 26,65, 36,56, 39,49, 40,41 и 50,17 град, монтмориллонит с отражениями при углах 19,60 и 34,67 град и иллит, имеющий схожие с монтмориллонитом отражения. Высокотемпературный кристобалит в данном случае не является самостоятельной минеральной фазой, а представляет собой структурный элемент

Таблица 1. **Химический состав компонентов, мас. %**

Компонент	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	FeO	Fe_2O_3	TiO_2	MnO	K_2O	Na_2O	SO_3	$\Delta m_{прк}$
Трепел	76,7	0,7	7,7	1,2	0,9	4,8	0,3	—	0,4	0,6	0,6	6,1
ДГШ	38,2	38,6	10,5	7,6	—	0,1	0,8	0,3	0,7	0,6	2,0	0,1
ХММС	50,1	19,3	7,4	13,7	4,0	4,4	0,9	—	—	—	—	0,2

этой формы кремнезема. Его рефлексы достаточно редко отмечаются на дифрактограммах опал-кристобалитовых пород, тогда как более часто диагностируется низкотемпературный кристобалит (α-кристобалит), что указывает на начало раскристаллизации опала. Присутствие высокотемпературного кристобалита может объясняться метастабильностью многих разновидностей SiO_2, часто существующих в опал-кристобалитовой породе вне пределов термодинамических условий их образования [16]. Результаты сканирующей электронной микроскопии трепела подтверждают присутствие опал-кристобалитовой составляющей в виде рыхлых глобул размерами порядка 1–2 мкм (рис. 2, *б*). Согласно [16], это так называемая леписферовая структура: внешняя часть глобул ощетинивается кристалликами люссатита — неупорядоченного кристобалита. Идентифицированы также останки панцирей диатомовых водорослей размерами 20–30 мкм (рис. 2, *а*) и примеси глинистых минералов в виде чешуек.

Для приготовления суспензий использовали 4,3 н. раствор NaOH. Трепел высушивали до постоянной массы при 100 °С и измельчали в порошок до полного прохода через сито с размером ячейки 0,16 мм. Трепел и раствор NaOH в соотношении *S:L*, равном 1:4,4, смешивали в цилиндрических сосудах из нержавеющей стали. Соотношение *S:L* и концентрацию раствора NaOH принимали, исходя из предположения о примерном содержании в трепеле 50 мас. %

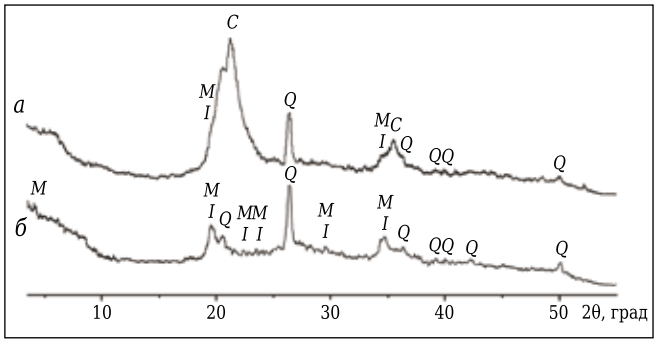

Рис. 1. Дифрактограммы: *а* — трепел Суходожского месторождения; *б* — нерастворимый остаток трепела после выщелачивания; *С* — β-кристобалит; *I* — иллит; *М* — монтмориллонит; *Q* — кварц

аморфного SiO_2, что теоретически дает после выщелачивания суспензию жидкого стекла с силикатным модулем, равным 1 (метасиликат), и с концентрацией SiO_2 100 г/л.

Сосуды накрывали крышками, смесь подвергали выщелачиванию по режиму: нагрев 30 мин, выдержка при 95 °С с перемешиванием через каждые 10 мин, естественное остывание до (22±2) °С. Затем с помощью лабораторной центрифуги MPW-251, Польша, при частоте вращения 5000 мин$^{-1}$ суспензия разделялась на две составляющие: окрашенное в темно-бурый цвет жидкое стекло и нерастворимый остаток (в виде густой массы). Продолжительность вращения составляла 5 мин. Для определения концентрации перешедшего в раствор SiO_2 и силикатного

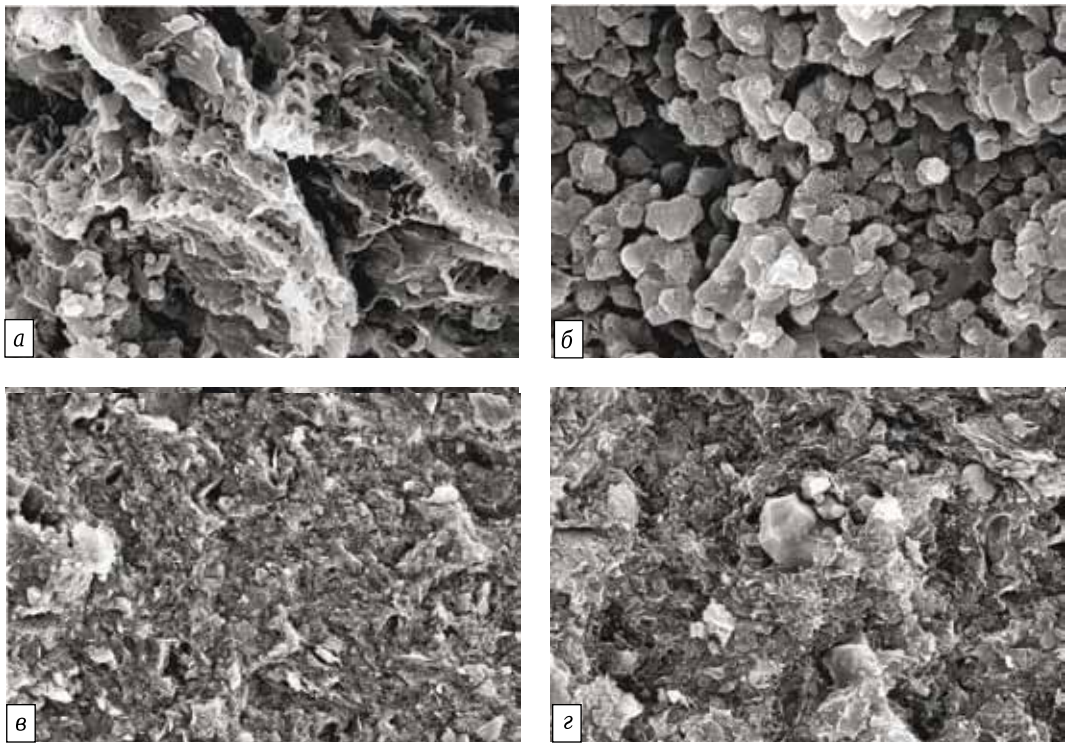

Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия: *а*, *б* — природный трепел (×2000 и ×5000); *в*, *г* — нерастворимый остаток, отмытый водой (×500 и ×2000)

модуля в зависимости от продолжительности выдержки при 95 °С жидкие стекла анализировали с использованием экспресс-метода [17]. Таким образом были получены три различных вида силикатнатриевых затворителей шлакощелочного бетона: суспензия, окрашенное жидкое стекло в виде отфильтрованной части суспензии и нерастворимый остаток суспензии.

Алюмосиликатной составляющей композиции служил ДГШ, химический состав которого приведен в табл. 1. Шлак измельчали в вибрационной мельнице до удельной поверхности частиц 300 м^2/кг. На дифрактограмме ДГШ сколь-либо значимые рефлексы отсутствуют, что указывает на его преимущественно аморфное строение. В качестве заполнителя жаростойких бетонов использовали крупнотоннажный отход обогащения титаномагнетитов Качканарского горно-обогатительного комбината в виде хвостов мокрой магнитной сепарации (ХММС). Главным минеральным компонентом хвостов является диопсид $CaMgSi_2O_6$ — тугоплавкий силикат из группы пироксенов [18]. Химический состав ХММС представлен в табл. 1. По данным рентгенофазового анализа (рис. 3), кроме диопсида ХММС содержат такие тугоплавкие минералы, как энстатит $Mg_2Si_2O_6$ и эссенейит $CaFe^{3+}AlSiO_6$. Присутствие этих минералов в хвостах создает предпосылки для их применения в качестве заполнителя жаростойких бетонов. Фракционный состав ХММС характеризуется частными остатками на ситах, мас. %: 5 мм 0,2, 2,5 мм 1,3, 1,25 мм 8,9, 0,63 мм 24,1, 0,315 мм 37,3, 0,14 мм 21,5, мельче 0,14 мм 6,7. Насыпная и истинная плотность материала 1540 и 3320 кг/м^3 соответственно.

Приготовление и определение физико-механических свойств шлакощелочных вяжущих проводили по стандартным методикам для испытаний цементов EN 196. Бетонные смеси готовили вручную в сферической чаше: к трем весовым частям ХММС добавляли одну часть ДГШ, после их перемешивания вводили силикатнатриевый компонент: суспензию, жидкое стекло или нерастворимый остаток, далее всю

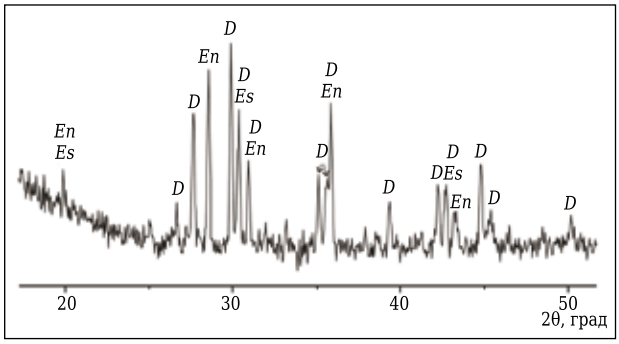

Рис. 3. Дифрактограмма хвостов обогащения титаномагнетита Качканарского ГОКа: *D* — диопсид; *En* — энстатит; *Es* — эссенейит

смесь вновь перемешивали. Расход силикатнатриевого компонента подбирали таким образом, чтобы количество Na_2O составляло 5 % от массы ДГШ. По мере надобности в смеси добавляли воду для достижения их равной подвижности, которая соответствовала жесткости, равной 30 с, согласно методике испытаний бетонных смесей EN 12350-3. Далее смеси подвергали виброуплотнению в стальных формах, амплитуда и частота колебаний виброплощадки составляли соответственно 0,5 мм и 3000 мин$^{-1}$. Через 30 мин образцы в формах подвергали термообработке в среде насыщенного водяного пара при атмосферном давлении и температуре 90 °С в течение 12 ч. Равномерный нагрев и остывание до комнатной температуры происходили в течение 2 ч. Для последующих испытаний образцы извлекали из форм и хранили в течение 28 сут на открытом воздухе при (22±2) °С и относительной влажности (60±5) %.

Пределы прочности при изгибе и сжатии определяли в соответствии с требованиями EN 196-1, остаточная прочность бетонов при температуре нагрева 800 °С — по ГОСТ 20910. Термостойкость в водяных теплосменах оценивали на образцах-кубах с ребром 7 см по ГОСТ 20910. Водостойкость образцов характеризовалась коэффициентом размягчения. Его значение принималось равным отношению прочности образцов при сжатии в водонасыщенном и исходном состоянии. Морозостойкость бетонов определяли на образцах-кубах с ребром 7 см по ГОСТ 10060.2. Оптимальную продолжительность выщелачивания трепела устанавливали путем определения концентрации SiO_2 осветленной части суспензии после выдержки при 95 °С. Так, для принятых соотношения *S:L* и концентрации раствора NaOH максимальная концентрация SiO_2 достигается через 1 ч и составляет 160 г/л; силикатный модуль суспензии 1,37. Увеличение продолжительности выщелачивания до 4 и 8 ч не ведет к существенному изменению концентрации SiO_2, следовательно, можно принять, что процесс выщелачивания протекает в течение 1 ч.

На дифрактограмме отмытого нерастворимого остатка суспензии после 1-ч термообработки (рис. 1, *б*) отсутствуют отражения, соответствующие β-кристобалиту, и сильнодисперсный рефлекс в диапазоне 2θ = 18÷26 град (см. рис. 1, *а*), соответствующий аморфному SiO_2. Этот факт свидетельствует о растворении опал-кристобалитовой составляющей трепела с образованием суспензии жидкого стекла. Результаты сканирующей электронной микроскопии нерастворимого остатка подтверждают его дифракционную картину. На рис. 2, *в*. *г* видны зерна кварца и глинистая составляющая трепела, имеющая слоистое и чешуйчатое строение. Наличие разновидностей SiO_2 в виде глобул или

панцирей диатомей не идентифицируется, что указывает на их растворение в щелочном растворе. Таким образом, нерастворимый остаток суспензии представляет собой смесь, состоящую преимущественно из минералов, содержащихся в трепеле до выщелачивания: кварца, монтмориллонита и иллита. Продукты взаимодействия глинистых минералов с NaOH в виде синтетических цеолитов установить не удалось. По-видимому, сдерживающим фактором в образовании этих продуктов является наличие силикатных анионов различной степени полимеризации (в отличие от исходного предположения).

В табл. 2 приведены результаты исследований основных свойств щлакощелочных вяжущих в зависимости от вида затворителя. Жидкое стекло и нерастворимый остаток были получены путем центрифугирования суспензии 1-ч гидротермальной обработки. Все затворители вводили в эквивалентных по содержанию Na_2O количествах, обеспечивающих равное весовое соотношение ДГШ : Na_2O, что сказалось на различном содержании ДГШ и затворителя (см. табл. 2). Почти двукратное увеличение сроков начала и конца схватывания шлакощелочного вяжущего на нерастворимом остатке связано с добавлением воды, требуемой для обеспечения одинаковой консистенции смесей. Разбавление нерастворимого остатка неизбежно приводит к снижению общей концентрации гидроксид-ионов и, как следствие, к увеличению сроков схватывания и почти двукратному снижению предела прочности при сжатии. Сроки схватывания композиций на суспензии и полученном из нее жидком стекле существенно не зависят от типа затворителя и примерно соответствуют портландцементу.

Продукты взаимодействия суспензии и ДГШ в виде искусственного камня исследовали с применением рентгенофазового анализа. Помимо отражений, характерных для монтмориллонита, иллита и кварца, идентифицируется рефлекс при 0,303 нм (2θ = 29,1 град), что указывает на кристаллическую природу новообразований камня. Однако идентифицировать синтезированный продукт твердения не представляется возможным. Как видно из табл. 2, наибольшей прочностью обладает шлакощелочное вяжущее на суспензии. Причиной тому может служить как введение в смесь дополнительного микронаполнителя в виде частиц нерастворимого остатка суспензии, способствующего более упорядоченной упаковке мелкодисперсных компонентов вяжущей системы, так и упрочняющее влияние новообразований камня.

В табл. 3 приведены основные свойства шлакощелочных бетонов с применением трех видов затворителей. Образцы на нерастворимом остатке имеют пониженную среднюю плотность, что связано с более высоким содержанием глинистых фракций. Такая смесь в результате требует дополнительного введения воды для достижения одинаковой жесткости, что, в свою очередь, создает повышенную пористость цементной матрицы после твердения. Повышенная пористость образцов на нерастворимом остатке подтверждается тем, что их водопоглощение вдвое превосходит водопоглощение образцов на суспензии и жидком стекле (см. табл. 3). В результате предел прочности при изгибе образцов на нерастворимом остатке (6,2 МПа) и сжатии (46 МПа) почти вдвое ниже, чем у образцов на суспензии и жидком стекле. Как и в случае с вяжущими композициями (см. табл. 2), снижение прочности образцов на нерастворимом остатке, возможно, связано со снижением концентрации гидроксид-ионов в результате разбавления смеси водой для достижения одинаковой жесткости. Наибольший предел прочности при сжатии имеют образцы на суспензии (88 МПа), у образцов на жидком стекле она несколько ниже (82 МПа). В первом случае это, по-видимому, связано с введением дополнительного микронаполнителя из нерастворимого остатка суспензии, что

Таблица 2. **Свойства шлакощелочного вяжущего в зависимости от вида затворителя**

Состав	Тип затворителя	ДГШ / затворитель, %	Сроки схватывания, ч -- мин		Предел прочности при сжатии, МПа
			начало	конец	
1	Суспензия	70 / 30	1 – 00	3 – 00	77,2
2	Жидкое стекло	71 / 29	1 – 05	3 – 00	72,0
3	Нерастворимый остаток	66 / 34	1 – 55	6 – 30	40,4

Таблица 3. **Свойства жаростойких бетонов в зависимости от вида затворителя**

Состав	Тип затворителя	Средняя плотность, кг/м^3	Предел прочности, МПа		Водопоглощение, мас. %	Коэффициент размягчения	Остаточная прочность, %	Термостойкость, водяные теплосмены
			при изгибе	при сжатии				
1	Суспензия	2550	11,6	88,0	1,4	0,90	111	26
2	Жидкое стекло	2560	12,4	82,0	1,2	1,00	139	32
3	Нерастворимый остаток	2505	6,2	46,0	3,6	0,87	134	18

создает более упорядоченную упаковку частиц цементной матрицы. Похожая закономерность наблюдается у шлакощелочных вяжущих (см. табл. 2, составы 1 и 2). Однако при определении предела прочности при изгибе образцов наблюдается обратная картина: 12,4 против 11,6 МПа при использовании в качестве затворителя жидкого стекла и суспензии соответственно. Причину несоответствия пока установить не удается.

Наибольшей водостойкостью обладают образцы на жидком стекле, т. е. без глинистых примесей. По сравнению с образцами на жидком стекле использование суспензии и нерастворимого остатка снижает коэффициент размягчения образцов от 1 до 0,9 и 0,87 соответственно (см. табл. 3). Наблюдается прямая зависимость коэффициента размягчения образцов от их водопоглощения: с ростом последнего коэффициент размягчения снижается. Таким образом, рост содержания в материале нерастворимого остатка приводит к увеличению его пористости за счет необходимости введения дополнительного количества воды для достижения одинаковой жесткости бетонных смесей. Увеличение пористости вполне закономерно приводит к снижению коэффициента размягчения образцов. В прямой взаимосвязи от водопоглощения находится также и морозостойкость образцов. При этом число циклов замораживания-оттаивания у составов на суспензии, жидком стекле и нерастворимом остатке составляет 260, 290 и 40 соответственно. Такие показатели морозостойкости образцов косвенно характеризуют их капиллярную пористость, которая, как и водопоглощение (см. табл. 3), возрастает в ряду затворителей: жидкое стекло – суспензия – нерастворимый остаток. Увеличение содержания в образце нерастворимого остатка вызывает увеличение его капиллярной пористости и водопоглощения, что негативно сказывается на способности образца выдерживать циклы попеременного замораживания-оттаивания, сохраняя при этом требуемую прочность.

Остаточная прочность полученных бетонов превышает исходную (после традиционного режима твердения) и, увеличиваясь в ряду затворителей: жидкое стекло – суспензия – нерастворимый остаток, составляет 139, 134 и 111 % соответственно. Вероятнее всего, увеличение прочности после нагревания связано с упрочнением цементной матрицы за счет формирования безводных силикатных новообразований — аналогов полевошпатных минералов типа анальцима, альбита и т. п. При этом вклад количественного содержания нерастворимого остатка в увеличение прочности неоднозначен, так как прирост прочности образцов на жидком стекле и нерастворимом остатке максимален (см. табл. 3), тогда как на суспензии — минимален.

Более явная закономерность влияния содержания нерастворимого остатка на свойства шлакощелочных жаростойких бетонов прослеживается при исследовании их термостойкости. Так, количество водяных теплосмен возрастает с уменьшением содержания нерастворимого остатка в ряду затворителей: нерастворимый остаток – суспензия – жидкое стекло (от 18 до 32 теплосмен, см. табл. 3). Аналогичная картина наблюдается для изменения пористости, водостойкости и морозостойкости образцов в указанном ряду. Следовательно, наиболее вероятной причиной возрастания термостойкости бетонов наряду со снижением содержания нерастворимого остатка является уменьшение пористости. Так, цикличность нагревания – водонасыщения, по-видимому, оказывает расклинивающее воздействие на систему цементная матрица – заполнитель, что еще больше усугубляется при повышении пористости за счет необходимости введения в бетон затворителя с нерастворимым остатком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Отработана методика получения трех видов силикатнатриевых затворяющих реагентов для приготовления шлакощелочных вяжущих и жаростойких бетонов: суспензия, полученная после ее центрифугирования, жидкое стекло и нерастворимый остаток в виде густой массы. Прочность бетонов существенно зависит от вида затворителя, несмотря на то что он вводился в эквивалентных по содержанию Na_2O количествах. В ряду суспензия – жидкое стекло – нерастворимый остаток предел прочности бетонов при сжатии снижается и составляет 88, 82 и 46 МПа соответственно.

2. Введение дополнительного количества воды для получения равноподвижных бетонных смесей (в случае применения суспензии и нерастворимого остатка) приводит к увеличению капиллярной пористости бетонов и их водопоглощения в ряду жидкое стекло – суспензия – нерастворимый остаток, что отрицательно сказывается на водостойкости и морозостойкости бетонов на суспензии и нерастворимом остатке.

3. Применение предложенных затворителей и заполнителя в виде хвостов обогащения титаномагнетитов открывает перспективы получения жаростойких бетонов на шлакощелочном вяжущем с остаточной прочностью до 139 % (нагрев до 800 °С) и термостойкостью до 32 водяных теплосмен.

4. С экономической точки зрения особое внимание заслуживает применение нерастворимого остатка. Являясь побочным продуктом производства жидкого стекла мокрым способом, он может служить самостоятельным затворителем шлакощелочного бетона, имеющего предел прочности при сжатии 46,0 МПа, остаточную прочность 134 % и выдерживающего до

18 циклов водяных теплосмен. Однако высокое содержание нерастворимых глинистых фракций требует дополнительных мер по снижению капиллярной пористости бетона, возникающей из-за повышенной водопотребности.

Библиографический список

1. ***Русина, В. В.*** Основы получения жидкого стекла из техногенного сырья / *В. В. Русина, Е. В. Корда* // Цемент и его применение. — 2012. — № 3. — С. 108–114.

2. ***Карнаухов, Ю. П.*** Особенности получения поризованных материалов для ограждающих конструкций из вспененного наполненного жидкого стекла / *Ю. П. Карнаухов, С. А. Белых, Т. А. Лебедева, А. И. Кудяков* // Изв. вузов. Строительство. — 2003. — № 2. — С. 59–63.

3. ***Глебов, М. П.*** Использование техногенных стоков целлюлозного производства при изготовлении стенового материала полусухого прессования / *М. П. Глебов, Н. А. Лохова, В. В. Шарова, С. В. Патраманская* // Изв. вузов. Строительство. — 2001. — № 1. — С. 49–53.

4. ***Иванов, Н. К.*** Структурообразование в системах на основе жидкого стекла и опаловых пород / *Н. К. Иванов, С. С. Радаев, С. М. Шорохов* // Строительные материалы. — 1998. — № 8. — С. 24, 25.

5. ***Иванов, Н. К.*** Изготовление строительных материалов на основе опалового сырья месторождений Тюменской и Свердловской областей / *Н. К. Иванов, С. А. Суворов, С. В. Склянов* // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 5. — С. 43–46.

6. ***Иващенко, Ю. Г.*** Свойства силикатнатриевого связующего, полученного на основе силицитовых пород методом гидротермального синтеза / *Ю. Г. Иващенко, А. В. Страхов* // Вестник Саратовского ГТУ. — 2010. — Т. 4, № 1 (49). — С. 193–200.

7. ***Purdon, A. O.*** The action of alkali on blast-furnace slag / *A. O. Purdon* // J. Soc. PChem. Industry, London. — 1940. — Vol. 59, № 53. — P. 191–202.

8. ***Волянский А. А.*** Щелочные и щелочно-щелочноземельные гидравлические вяжущие и бетоны / *А. А. Волянский, В. Д. Глуховский, В. В. Гончаров* [и др.] ; под общей ред. В. Д. Глуховского. — Киев : Вища школа, 1979. — 231 с.

9. ***Balayan, M. A.*** Properties of siliceous solutions based on Ural diatomites / *M. A. Balayan, A. G. Balekaev* // Glass Ceram. — 1988. — Vol. 45, № 9. — P. 325–327.

10. ***Филиппович, Е. Н.*** Выбор оптимальной обработки диатомита Инзенского месторождения для получения кристаллических силикатов натрия / *Е. Н. Филиппович, А. И. Хацринов, Т. В. Егорова* // Вестник КазГУ. — 2010. — № 8. — С. 272–276.

11. ***Breck, D. W.*** Zeolite molecular sieves: structure, chemistry and use / *D. W. Breck*. — New York : Wiley, 1973. — 771 p.

12. ***Ruiz-Santaquiteria, C.*** Clay reactivity: production of alkali activated cements / *C. Ruiz-Santaquiteria, A. Fernández-Jiménez, J. Skibsted, A. Palomo* // Applied Clay Science. — 2013. — Vol. 73. — P. 11–16.

13. ***Иванов, Н. К***. Степень полимеризации и щелочность жидких стекол / *Н. К. Иванов, К. С. Иванов, С. С. Радаев* // Техника и технология силикатов. — 2015. — № 4. — С. 12–18.

14. ***Кривенко, П. В.*** Шлакощелочные вяжущие нового поколения / *П. В. Кривенко, Ж. В. Скурчинская, Ю. А. Сидоренко* // Цемент. — 1991. — № 11/12. — С. 4–8.

15. ***Ахтямов, Р. Р.*** Жаростойкий бетон повышенной термостойкости на шлакощелочном вяжущем / *Р. Р. Ахтямов* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2010. — № 3. — С. 43–46.

16. ***Сеньковский, Ю. Н.*** Литогенез кремнистых толщ юго-запада СССР / *Ю. Н. Сеньковский*. — Киев : Наукова думка, 1977. — 127 с.

17. ***Sokolovich, V. E.*** Rapid method of determining the modulus of sodium silicate solution / *V. E. Sokolovich* // Glass Ceram. — 1963. — Vol. 20, № 9. — P. 471, 472.

18. ***Борисенко, Л. Ф.*** Комплексное использование титаномагнетитовых руд / *Л. Ф. Борисенко, Л. М. Делицын, В. А. Полубабкин, Е. Д. Усков*. — М. : МПР РФ. ЗАО «Геоинформарк», 1997. — 65 с. ■

Получено 12.04.17
© К. С. Иванов, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ