

В.В. РУСИНА, канд. техн. наук (Rusina07@bk.ru),  
Братский государственный университет (Иркутская обл.)

## Жаростойкие бетоны с использованием техногенного сырья

Особенностью жаростойких бетонов является формирование строительно-монтажных свойств изделий из них в результате твердения при нормальных условиях, гидротермальной обработки или в процессе термообработки при невысоких температурах. Эксплуатационные же свойства такие материалы приобретают в процессе первого разогрева на рабочую температуру. Комплекс этих свойств определяется качеством формируемой при разогреве вторичной структуры. Последняя решающим образом зависит от химического и фазового состава цементирующего вещества и его объемного содержания в бетоне, т. е. от первичной структуры бетона. В жаростойких бетонах в процессе первого разогрева до рабочей температуры происходит перерождение вяжущего в керамический черепок. В период такого перерождения происходит значительное снижение несущей способности вяжущего. Поэтому очень важно в процессе первого разогрева печных агрегатов сохранить несущую способность изделий и конструкций из жаростойких бетонов. Достичь этого можно следующими технологическими приемами:

- созданием жестко фиксированного каркаса из огнеупорного заполнителя, который позволил бы включить в работу силы сцепления между частицами;
- использованием такого минимально допустимого содержания вяжущего, которого в расплавленном виде хватает для заполнения пустот между частицами огнеупорного заполнителя. Образующиеся при этом мениски расплава стягивают частицы заполнителя и удерживают изделие от деформаций.

Содержание цементирующего вещества в бетоне легко поддается регулированию путем дозировки его компонентов, условий и режимов формирования структуры на основе известных из общего бетоноведения методов. Химический и фазовый составы цементирующего вещества жаростойких бетонов можно регулировать, меняя химико-минералогический состав вяжущих [1]. Поэтому разработка новых видов вяжущих для получения жаростойких бетонов имеет важное научное и прикладное значение. Причем последнее связано не только с возможностью улучшения качества и технико-экономических показателей, но и с тем, что в последние годы производство жаростойких бетонов все больше сосредотачивается непосредственно в отраслях и на предприятиях – потребителях этих материалов.

В настоящее время проблема получения жаростойких бетонов тесно связана как с улучшением технологических и эксплуатационных свойств материала, так и с использованием техногенного сырья, возможности которого для этих целей недостаточно исследованы. В этой связи практический интерес представляет разработка новых видов жаростойких бетонов, производимых по малоэнергоёмким технологиям на основе местных сырьевых материалов, различных промышленных отходов и побочных продуктов.

Применительно к производству жаростойких бетонов особое место занимают алюмосиликатные соединения каркасной структуры, аналогичные природным цеолитам. Соединения цеолитовой структуры, являющиеся основой щелочных и щелочно-щелочно-земельных вяжущих (в том числе шлако- и золощелочных), способны дегидратироваться без разрушения жесткого

алюмосиликатного каркаса вплоть до температур 920–1100°C в зависимости от размера иона щелочного металла и соотношения  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  [2].

В Братском государственном университете с использованием жидкого стекла из микрокремнезема Братского ферросплавного завода (БЗФ) и многотоннажных золошлаковых отходов [3] разработаны:

- *шлакощелочное вяжущее* (ШЩВ) с использованием молотых гранулированных ваграночного шлака ПО «Сибтепломаш» (г. Братск) или шлаковой составляющей отвальной золошлаковой смеси (ЗШС) ТЭЦ-6 «Иркутскэнерго» (г. Братск);
- *золощелочное вяжущее* (ЗЩВ) с применением золы-уноса ТЭЦ-7 «Иркутскэнерго» (г. Братск) или зольной составляющей отвальной ЗШС ТЭЦ-6 «Иркутскэнерго» (г. Братск);
- *золошлакощелочное вяжущее* (ЗШЩВ) на базе молотой отвальной ЗШС ТЭЦ-6 «Иркутскэнерго» (г. Братск).

Исследованиями установлено, что продуктами твердения этих вяжущих являются низкоосновные гидросиликаты кальция группы CSH(V) и алюмосиликатные соединения каркасной структуры, аналогичные природным цеолитам и слюдам [3]. Как известно, гидрo-алюмосиликаты цеолитовой структуры, являющиеся основными цементирующими новообразованиями ШЩВ и ЗЩВ, определяют качество первичной структуры бетона и его специфические свойства. В частности, цеолитовая вода этих новообразований ведет себя как сорбционная и удаляется из материала постепенно, а обезвоживание происходит практически без разрушения структуры материала. Это позволило получить на основе разработанных вяжущих жаростойкие бетоны.

Даже без использования специальных жаростойких заполнителей и введения каких-либо корректирующих добавок (табл. 1) остаточная прочность образцов состава кварцевый песок : зола-унос = 1 : 3 (после их испытания при  $T = 600, 800, 1000^\circ\text{C}$ ) составляет соответственно до 77,2; 62 и 85,7%, а деформации усадки не превышают 2%. Вполне очевидно, что жаростойкость исследуемого материала связана прежде всего с особенностями фазового состава продуктов гидратации ЗЩВ, в частности со способностью гидратных новообразований к перекристаллизации в безводные вещества без развития значительных деструктивных напряжений в структуре обожженного искусственного камня.

При замене кварцевого песка на заполнитель того же зернового состава и крупности ( $M_{кр} = 2,34$ ), но представляющего собой отсев от дробления диабазовых глыб на щебень, остаточная прочность мелкозернистого золощелочного бетона возрастает в среднем на 15%, а деформации усадки снижаются до 1,5–1,2%.

Эффективным (табл. 2) можно считать использование в качестве заполнителя шлаковой составляющей отвальной ЗШС. В этом случае остаточная прочность исследуемого бетона возрастает до 90,1–102,2%, а огневая усадка во всех случаях составляет менее 1%. Вероятно, одна природа и схожие составы заполнителя (шлак ЗШС) и алюмосиликатного компонента вяжущего (зола-унос) обуславливают близкие значения коэффициента термического расширения. Кроме того, ЗШС уже в период своего образования прошла высокотемпературную обработ-

Таблица 1

Вид заполнителя	Прочность при сжатии сразу после ТВО, МПа	Свойства мелкозернистого золощелочного бетона после испытания при температуре					
		600°C		800°C		1000°C	
		Остаточная прочность, %	Усадка, %	Остаточная прочность, %	Усадка, %	Остаточная прочность, %	Усадка, %
Кварцевый песок ( $M_{кр}=2,3$ )	25,97	38	1,8	39	2	61,6	1,9
	30,49	49	1,7	42,3	1,8	63,6	1,6
	35,76	77,2	1,6	62	1,6	85,7	1,5
Отсев диабазового щебня ( $M_{кр}=2,34$ )	26,61	44,8	1,4	42,5	1,5	66,5	1,4
	31,17	60,3	1,4	50,4	1,4	78,9	1,5
	37,45	88,1	1,2	75	1,3	97,7	1,4

Таблица 2

Свойства мелкозернистого золощелочного бетона на шлаковом заполнителе после ТВО и последующего высушивания										
ТВО и последующего высушивания			испытания при температуре							
			400°C		600°C		800°C		1000°C	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Остаточная прочность, %	Усадка, %	Остаточная прочность, %	Усадка, %	Остаточная прочность, %	Усадка, %	Остаточная прочность, %	Усадка, %
			1570	4,3	17,1	102,2	0,8	93,4	0,9	90,1

Таблица 3

Остаточная прочность бетона, %, после испытания при T=800°C	Бетон на жидком стекле из микрокремнезема			
	I тип	II тип	III тип	IV тип
	114,4	113	104,2	100,9

ку, а потому мало подвержена температурным деформациям. И наконец, высокая активность шлакового заполнителя, обусловленная его химико-минералогическим составом, способствует (за счет взаимодействия по поверхности с жидким стеклом) дополнительному формированию цеолитоподобных новообразований, обладающих высокой термической стойкостью.

Еще одним фактором, способным оказывать влияние на формирование структуры и свойств исследуемых материалов, является жидкое стекло из микрокремнезема [4]. Результаты выполненных экспериментов показывают, что на повышении марочной прочности и жаростойкости исследуемых бетонов благоприятно сказывается использование низкомолекулярного ( $n=1-1,5$ ) жидкого стекла. Вполне очевидно, что это вызвано процессом гидролиза жидкого стекла. Низкомолекулярные щелочные силикаты подвергаются в водных растворах более полному гидролизу и диссоциации. Гидролиз происходит с наибольшей полнотой, большее количество натрия находится в активном ионном состоянии, концентрация ионов  $OH^-$  увеличивается. Следствием этого является ускорение процесса растворения зерен шлака или золы, а также диффузии между жидким стеклом и гелевой пленкой шлака (золы). В результате формируются прочные и термостойкие новообразования – цеолитоподобные минералы. В высокомолекулярных щелочных силикатах эти процессы происходят менее интенсивно. Коллоидный кремнезем адсорбирует ионы  $OH^-$  тем в большей степени, чем выше значение силикатного модуля. В этом случае в растворе присутствуют не вполне диссоциированные молекулы, а наличие крупных коллоидных комплексов затрудняет процессы диффузии. Все это снижает растворимость шлака или золы, и, как следствие, замедляется формирование термостойких новообразований.

Однако необходимо отметить, что вяжущие на жидком стекле из микрокремнезема БЗФ существенно отличаются от известных ШЩВ и ЗЩВ [3, 5] – содержат в своем составе мельчайшие кристаллические частицы графита (С) и карбида кремния ( $\beta-SiC$ ). Причем в зависимости от типа микрокремнезема, обусловленного степенью очистки газов, количество С и  $\beta-SiC$  различно [5].

Поэтому на основные показатели качества шлако- и золощелочных жаростойких бетонов оказывает существенное влияние тип микрокремнезема, используемого при получении жидкого стекла. Как видно из результатов эксперимента, представленных в табл. 3, наибольшей жаростойкостью (114,4%) обладают образцы бетона на жидком стекле из микрокремнезема I типа, содержащего до 7–8%  $\beta-SiC$  и до 5% графита, а наименьшей (100,9%) – бетона на жидком стекле из микрокремнезема IV типа, в составе которого до 1–2%  $\beta-SiC$  и до 6–7% графита. Возможно, это вызвано особенностями процессов структурообразования исследуемых материалов. Как известно, появление зародышевых новообразований наиболее вероятно не в объеме раствора, а в непосредственной близости от поверхности твердых частиц, играющих роль подложек, поскольку такой процесс энергетически более выгоден. Мельчайшие частицы графита и карборунда интенсифицируют процесс твердения вяжущих, а возникновение новообразований различного состава происходит вначале на поверхности мельчайших частиц С и  $\beta-SiC$ , а затем в межзерновом пространстве твердеющих вяжущих систем. Причем, как показали исследования, графит способствует преимущественному формированию низкокремнеземистых цеолитоподобных соединений в виде тонкозернистых чешуйчатых агрегатов парагонита и округлых агрегатов жисмондина, а карбид кремния – высококремнеземистого цеолитоподобного соединения – анальцима, представленного радиально-лучистыми агрегатами. В этой связи необходимо отметить, что наличие гидроалюмосиликатов различного состава (высоко- и низкокремнеземистых) значительно расширяет интервал температуры удаления цеолитовой влаги, что позволяет получать жаростойкие бетоны, не требующие специального высушивания, а тепловые агрегаты

из таких бетонов могут подвергаться первому разогреву по интенсивным режимам.

Между тем влияние  $\text{C}$  и  $\beta\text{-SiC}$  на формирование структуры и свойств ШЩВ, ЗЩВ и ЗШЩВ на жидком стекле из микрокремнезема проявляется не только в эффекте ускорения твердения на подложке. Так, с точки зрения принципа максимального заполнения в структуре материала должно быть как можно меньше пустот, не заполненных частицами меньшего размера, так как от соотношения пустых и заполненных промежутков зависит свойства реального материала. Примеси жидкого стекла из микрокремнезема, располагаясь в порах твердого материала, создают тем самым физическую структуру золощелочного и шлакощелочного цементного камня. Вполне очевидно, что с увеличением доли содержащихся в жидком стекле мельчайших частиц  $\text{C}$  и  $\beta\text{-SiC}$  плотность упаковки повышается за счет заполнения ими капиллярных пор. Уменьшение же свободного объема капиллярных пор, в свою очередь, приводит к тому, что заполнение их гелеобразными продуктами гидратации происходит быстрее, в результате чего увеличивается скорость нарастания прочности. Следовательно, в этом отношении, более предпочтительно жидкое стекло из микрокремнезема I типа. И наконец, частицы  $\beta\text{-SiC}$ , обладающего высокой прочностью и термостойкостью, снижают деформации усадки, выполняя при этом роль жаростойкого микронаполнителя. Кроме того, известно, что при высокотемпературном воздействии кристаллы кубической сингонии ( $\beta$ -модификация  $\text{SiC}$ ) характеризуются одинаковой скоростью линейного расширения по всем направлениям, что также оказывает положительное влияние на жаростойкость материала. Поэтому жаростойкость образцов на жидком стекле из микрокремнезема I типа, содержащего (по сравнению с микрокремнеземом других типов) наибольшее количество карбида кремния, ха-

рактеризуется максимальной остаточной прочностью и минимальной огневой усадкой (0,8–1,3%).

Разработанные составы и технологические приемы получения жаростойких бетонов на техногенном сырье признаны Роспатентом патентоспособными.

Таким образом, все выполненные исследования показали не только возможность, но и целесообразность использования техногенного сырья в производстве жаростойких бетонов. Данные по объемам образования микрокремнезема, золы-уноса, золошлаковых смесей и отсева от дробления диабазового щебня подтверждают, что эти отходы могут служить стабильной сырьевой базой. К этому следует добавить, что перспективными запасами вышеперечисленных отходов являются отвалы.

**Ключевые слова:** жаростойкие бетоны, жаростойкость, остаточная прочность, жидкое стекло, микрокремнезем, графит, карборунд, зола, шлак, золошлаковая смесь, цеолитоподобные соединения.

**Список литературы**

1. Горлов Ю.П., Меркин А.П., Зейфман М.И., Тотурбиев Б.Д. Жаростойкие бетоны на основе композиций из природных и техногенных стекол. М.: Стройиздат, 1986. 144 с.
2. Глуховский В.Д. Щелочные вяжущие системы // Цемент. 1990. № 6. С. 3–7.
3. Русина В.В. Золошлакощелочные вяжущие на основе жидкого стекла из примесесодержащего микрокремнезема // Строительные материалы. 2011. № 11. С. 25–28.
4. Русина В.В. Жидкое стекло из микрокремнезема // Известия вузов. Строительство. 2004. № 9. С. 122–125.
5. Русина В.В. Закономерности формирования состава и свойств микрокремнезема // Бетон и железобетон. 2009. № 3. С. 20–23.

**V Международная конференция**

**НАНОТЕХНОЛОГИИ  
для экологичного и долговечного строительства**

23–25 марта 2013 г.

Каир, Египет

**Организаторы конференции:**

Египетско-российский университет (ERU),

Национальный исследовательский центр жилья и строительства (HBRC),

Ижевский государственный технический университет



**Тематика конференции:**

- Нанокompозиты в строительных материалах
- Нанотехнологии в строительстве
- Защита от пожара с помощью наночастиц
- Нанотехнологии в кондиционировании воздуха
- Наноструктурирующие материалы в архитектуре
- Производство лакокрасочных материалов с нанодобавками
- Нанотехнологии в стеклах и керамике
- Нанотехнологии для энергоэффективности в зданиях
- Моделирование нанокompозитов
- Модификация минеральных вяжущих наносистемами

В дни проведения конференции будет работать выставка нанопродуктов, нанооборудования и других специализированных изделий.

**Информационная поддержка – журнал «Строительные материалы»®**



**Сайт конференции: [http://inter.istu.ru/russian/nano\\_r.html](http://inter.istu.ru/russian/nano_r.html)**

**Контактная информация в Египте:**

Профессор Шериф Солиман Хелми  
Египетско-российский университет  
Cairo High Road, Bard City-Suez  
E-mail: president@eruegypt.com

Тел.: +20 (02) 28643349, (02) 28643341 Факс: +20 (02) 28643332

**Контактная информация в России:**

Профессор Григорий Иванович Яковлев  
Ижевский государственный технический университет  
426069 Ижевск, ул. Студенческая, д. 7  
E-mail: gyakov@istu.ru

Тел.: +7(3412) 59 33 07 Факс: +7(3412) 59 25 55

# СПЕЦИАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО СКБ СТРОЙПРИБОР

ПРИБОРЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ



тел/факс в Челябинске: (351) 790-16-13, 790-16-85, 796-64-14  
в Москве: (495) 964-95-63, 220-38-58  
e-mail: stroypribor@chel.surnet.ru  
www.stroypribor.ru

Реклама

## ИЗМЕРИТЕЛИ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА, КИРПИЧА

**ИПС-МГ4.01 / ИПС-МГ4.03**  
ударно-импульсный

автоматическая обработка  
измерений



диапазон 3...100 МПа

**УКС-МГ4 / УКС-МГ4 С**  
ультразвуковой

поверхностное и сквозное  
прозвучивание



частота 60...70 кГц  
диапазон 10...2000 мкс

**ПОС-50МГ4 / ПОС-50МГ4 Д /  
ПОС-50МГ4 "Скол"**

отрыв со скалыванием  
и скалывание ребра

предельное  
усилие 60 кН  
диапазон 5...100 МПа



**ПОС-2МГ4 П**

испытание прочности  
ячеистых бетонов



предельное  
усилие вырыва 2,5 кН

**ПЛОТНОМЕРЫ ГРУНТОВ  
ДИНАМИЧЕСКИЕ**

**ПДУ-МГ4 "Удар"**

и **ПДУ-МГ4 "Импульс"**

определение динамического  
модуля упругости грунтов  
и оснований дорог  
методом штампа,  
диапазон: 5...370 МН/м<sup>2</sup> ("Удар")  
5...300 МН/м<sup>2</sup> ("Импульс")



**Прессы испытательные  
малогабаритные**

**ПГМ-100МГ4 / ПГМ-500МГ4  
/ ПГМ-1000МГ4**



с гидравлическим приводом  
для испытания бетона,  
асфальтобетона, кирпича  
■ предельная нагрузка  
100 / 500 / 1000 кН  
■ масса 70 / 120 / 180 кг

**ПМ-1МГ4 / ПМ-2МГ4 / ПМ-3МГ4  
/ ПМ-5МГ4 / ПМ-10МГ4**

с ручным / электрическим приводом  
для испытания утеплителей на изгиб  
и сжатие при 10% линейной деформации  
■ предельная нагрузка 1 / 2 / 3 / 5 / 10 кН  
■ масса 20 / 25 кг

**ПСО-10МГ4 КЛ**

испытание прочности  
сцепления в каменной  
кладке

предельное усилие  
отрыва 15 кН



**АДГЕЗИМЕТРЫ**

**ПСО-МГ4**

испытание прочности  
сцепления покрытия  
с основанием

предельная нагрузка  
1 / 2,5 / 5 / 10 кН



**ИЗМЕРИТЕЛИ  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

**ИТП-МГ4 "100" / "250" / "Зонд"**

стационарный  
и зондовый режимы



диапазон 0,02...1,5 Вт/м·К

**АНЕМОМЕТРЫ, ГИГРОМЕТРЫ**

**ИСП-МГ4 / ИСП-МГ4.01**  
анемометр-термометр

диапазон 0,1...20 (1...30) м/с  
-30...+100 °С



**ТГЦ-МГ4 / ТГЦ-МГ4.01**  
термогигрометр

диапазон 0...99,9 % / -30...+85 °С



**ИЗМЕРИТЕЛИ ПЛОТНОСТИ  
ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ**

**ИТП-МГ4.03 "Поток"**

3...5, 10 и 100-канальные  
регистраторы

диапазон 10...999 Вт/м<sup>2</sup>  
-40...+70 °С



**ИЗМЕРИТЕЛИ ВЛАЖНОСТИ**

**ВЛАГОМЕР-МГ4**

для измерения влажности  
бетона,  
сыпучих,  
древесины  
диапазон 1...45 %



**ИЗМЕРИТЕЛИ ТОЛЩИНЫ  
ЗАЩИТНОГО СЛОЯ БЕТОНА**

**ИПА-МГ4**

диаметр контролируемой  
арматуры 3...40 мм  
диапазон измерения  
защитного слоя 3...140 мм



**ТЕРМОМЕТРЫ**

**ТМР-МГ4 / ТЦЗ-МГ4 / ТЦЗ-МГ4.01**

модульные регистрирующие  
для зимнего бетонирования  
и пропарочных камер  
(до 20 модулей в комплекте)  
зондовые / контактные  
1...2-канальные  
диапазон -40...+100 / 250 °С



**ИЗМЕРИТЕЛИ СИЛЫ НАТЯЖЕНИЯ  
АРМАТУРЫ**

**ДО-40 / 60 / 80МГ4**

метод поперечной оттяжки

диапазон контролируемых  
усилий 2...120 кН

диаметр  
арматуры 3...12 мм



**ИЗМЕРИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЙ  
В АРМАТУРЕ**

**ЭИН-МГ4**

частотный метод

диаметр  
арматуры 3...32 мм

диапазон 100...1800 МПа



ПРОИЗВОДИМ: ИЗМЕРИТЕЛИ ВИБРАЦИИ, МОРОЗОСТОЙКОСТИ, ТОЛЩИНОМЕРЫ, ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ ВЕСЫ И ДР.