УДК 666.974.2 DOI: https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-43-47

В.В. РЕМНЁВ, д-р техн. наук, профессор, советник (rema97776952@yandex.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона – НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, к. 5)

Эффективный бетон повышенной термостойкости для теплозащитных покрытий стартовых сооружений ракетно-космических комплексов

Приведены технологические свойства жаростойкого бетона на жидкостекольном вяжущем. В качестве отвердителя применяются саморассыпающиеся феррохромовые шлаки, позволяющие резко повысить атмосферо и термостойкость таких бетонов. Кроме того, за счет использования замедлителя схватывания жидкостекольного вяжущего повышается скорость возведения монолитных конструкций при требуемом качестве строительства. Получен модифицированный жаростойкий бетон с улучшенными технологическими характеристиками на жидком стекле с добавкой К – замедлителем схватывания, шамотном заполнителе и отвердителе – феррохромовом шлаке, что дало возможность осуществить качественную укладку бетонной смеси в густоармированную конструкцию конуса-газорассекателя без снижения требуемых прочностных и огнестойких характеристик бетона.

Ключевые слова: *жаростойкие бетоны, жидкостекольные вяжущие, искусственный строительный конгломерат, матрица конгломерата, технология бетонирования конструкций бетонной смесью ЖСВ, тонкомолотый шамот.*

Для цитирования: Ремнёв В.В. Эффективный бетон повышенной термостойкости для теплозащитных покрытий стартовых сооружений ракетно-космических комплексов // *Бетон и железобетон*. 2022. № 1 (609). С. 43–47. DOI: https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-43-47

V.V. REMNEV, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, (rema97776952@yandex.ru)

Research, Design and Technological institute of Concrete and Reinforced Concrete – NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC "Research Center "Stroitel'stvo" (6, build. 5, 2-nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Effective Concrete of Increased Thermal Resistance for Heat Protective Coatings of Starting Facilities of the Rocket and Space Complex

The technological properties of heat-resistant concrete on a liquid-glass binder are presented. Self-disintergrating ferrochrome slags are used as a hardener, which can sharply increase the weather and heat-resistance of such concrete. In addition, due to the use of a retarder for the setting of a liquid-glass binder, the speed of construction of monolithic structures increases with their required construction quality. Modified heat-resistant concrete with improved technological characteristics was obtained on liquid glass with the addition of K-setting retarder, fireclay filler and hardener – ferrochrome slag, which made it possible to carry out high-quality laying of the concrete mixture into a densely reinforced cone-gas separator structure without reducing the required strength and fire-resistant characteristics of concrete.

Keywords: heat-resistant concretes, liquid-glass binders, artificial construction conglomerate, conglomerate matrix, technology of concreting structures with a concrete mixture of LCW, finely ground chamotte.

For citation: Remnev V.V. Effective concrete of increased thermal resistance for heat protective coatings of starting facilities of the rocket and space complex. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. № 1. (609), pp. 43–47. (In Russian).
DOI: https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-43-47

При разнообразии эксплуатационных условий работы стартовых сооружений ракетно-космических комплексов (РКК), находящихся в условиях агрессивного воздействия наружного воздуха и одновременно резкого перепада температуры, к материалам, из которых они возведены, предъявляются повышенные требования по их физико-механическим свойствам.

Они включают: прочностные характеристики (прочность при сжатии, изгибе и растяжении), морозостойкость, водонепроницаемость, стойкость к агрессивным средам в ходе эксплуатации и др. С точки зрения технологии строительного производства и дальнейшей эксплуатации железобетонных конструкций в агрессивных средах для их возведения наиболее целесообразно применять бетонные смеси на жидкостекольном вяжущем (ЖСВ).

Как известно, жидкое стекло представляет собой растворенные щелочные силикаты, характеризующиеся статической неупорядоченностью и свойствами кристаллических силикатов. Их твердение обусловлено способностью кремнийсодержащих химических связок (преимущественно с отвердителями) к полимеризации с образованием кремнийполимерного каркаса объемной сетчатой структуры. Способность золя кремнекислоты к полимеризации зависит от pH раствора. Для процесса твердения жидкого стекла традиционно наиболее широко применяется отвердитель – кремнефтористый натрий. Однако составы бетонов на кремнефтористом натрии неустойчивы

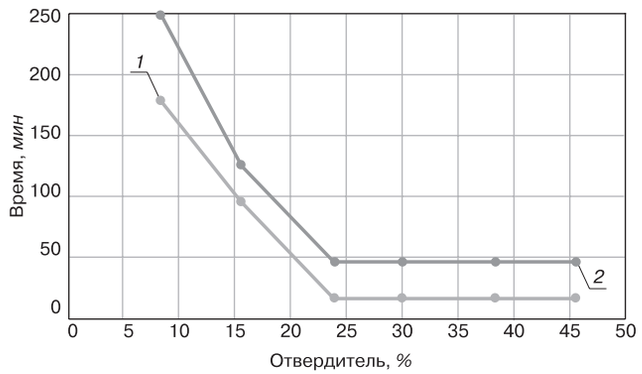

Рис. 1. *Зависимость сроков схватывания жидкостекольной матрицы от количества отвердителя: 1 – начало схватывания; 2 – конец схватывания*

Fig. 1. *Dependence of the setting time of the liquid glass matrix on the amount of hardener: 1 – beginning of setting; 2 – end of setting*

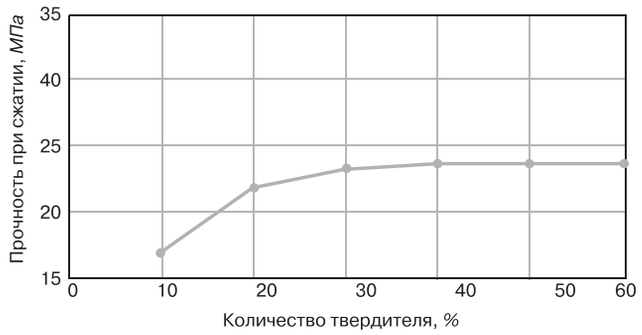

Рис. 2. *Зависимость прочности при сжатии матрицы от количества отвердителя при 20°С нормального хранения*

Fig. 2. *Dependence of the compressive strength of the matrix on the amount of hardener at 20°C normal storage*

в водных средах, например в обычных атмосферных условиях.

Как следует из литературных источников, наиболее стойкие в водной среде – бетоны на ЖСВ и с отвердителем в виде саморассыпающихся шлаков феррохромового производства [1–3]. Применение данных шлаков позволяет полностью исключить технологический предел помола отвердителя, что экономически целесообразно.

Определение оптимального количества отвердителя является одним из основных технологических факторов, от которого зависят удобоукладываемость, сроки схватывания и твердения, а также прочностные свойства получаемых бетонов.

Прежде чем рассматривать строительно-технические свойства бетонов на жидкостекольном (силикат-натриевом) вяжущем (ЖСВ), уточним терминологию, принятую в данной статье. Как известно, *искусственными строительными конгломератами (ИСК)* называют строительные материалы со своеобразной конгломератной структурой, к характерным признакам которой относится наличие заполняющей и вяжущей частей. Последняя цементирует заполнитель и по этой причине играет важную роль в формировании свойств конгломератов. К тому же по своему функциональному назначению и характеру вяжущая часть является своеобразным каркасом (матрицей) в структуре конгломерата. Под *каркасом (матрицей) конгломерата* следует понимать такую часть структуры, которая обладает комплексом признаков:

– достаточной однородностью состава и свойств;

– непрерывностью пространственной сетки, которую образуют эти структуры;

– устойчивостью первоначальной формы сетки и конгломерата при удалении заполняющего компонента (заполнителя);

– повышением или снижением прочности конгломерата при соответственном упрочнении или ослаблении его каркасной (матричной) части;

– повышением или понижением жесткости конгломерата с изменением в том же направлении жесткости его каркаса (матрицы).

В дальнейшем *матрицей* будем называть жидкостекольное или силикат-натриевое вяжущее. Исходные компоненты жидкостекольного вяжущего (матрицы) следующие:

– натриевое жидкое стекло по ГОСТ 13078–2021 «Стекло натриевое жидкое. Технические условия» (силикатный модуль 3);

– тонкомолотый шамот по ГОСТ 23037–99 «Заполнители огнеупорные. Технические условия»;

– феррохромовый шлак по ТУ 14-11–181–89 «Шлаки феррохромовые самораспадающиеся. Технические условия».

Одной из важных характеристик вяжущего являются его сроки схватывания и твердения. Они определялись иглой Вика по ГОСТ 310.3–76 «Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема». Как показали исследования, сроки схватывания ЖСВ изменяются непропорционально количеству вводимого отвердителя. При увеличении расхода отвердителя от 7,5 до 25% от массы жидкого стекла сроки схватывания снижаются со 180 до 15 мин, а при повышении от 26 до 40% снижаются до 13 мин (рис. 1). Экспериментальные данные указывают на повышение прочности при сжатии матрицы с содержанием отвердителя от 25 до 40% от массы жидкого стекла. Дальнейшее увеличение расхода отвердителя незначительно повышает прочность композиции.

Таким образом, полученный в ходе экспериментальных исследований состав ЖСВ: жидкое стекло – 32,6%; феррохромовый шлак – 8,15%; тонкомолотый шамот – 59,25% является оптимальным по прочности (рис. 2). Однако короткие сроки схватывания

(15 мин) затрудняют качественную укладку смеси в монолитную конструкцию.

Для регулирования сроков схватывания ЖСВ необходим недефицитный, дешевый замедлитель. Анализ литературных источников позволил определить, что неплохой эффект достигается введением в жидкое стекло гидрофобных поверхностно-активных веществ (ПАВ). Благодаря гибкости углеводородных цепей ПАВ обеспечивает более легкое скольжение при перемешивании частиц, на поверхности которых они адсорбируются, образуя тончайший слой. Получаемый эффект смазки очень велик – коэффициент трения между частицами уменьшается почти на три порядка. Возникающий пластифицирующий эффект объясняется «смазочным» действием гидрофобизирующего вещества.

Академик П.А. Ребиндер установил [2], что при кристаллизации растворов, содержащих поверхностно-активные вещества, происходит модифицирование, т. е. изменение формы и размеров растущих кристаллов. Адсорбирующиеся вещества понижают скорость роста граней кристаллов, на которых адсорбция особенно сильна, при сохранении той же кристаллической решетки. Проведенные экспериментальные исследования на эталонном составе (жидкое стекло – 32,6%; феррохромовый шлак – 8,15%; тонкомолотый шамот – 59,25%) показывают, что применение указанных добавок увеличивает сроки схватывания ЖСВ до 26 мин.

В ходе проводимых исследований было изучено влияние добавки К на ЖСВ. Расход добавки находился в пределах 2–14% от массы жидкого стекла. В начале добавка К смешивалась с жидким стеклом в течение 1 мин, затем с предварительно перемешанным тонкомолотым кварцем и феррохромовым шлаком. Анализ полученных данных (рис. 3) показывает, что введение в ЖСВ добавки К существенно изменяет сроки схватывания от 15 мин без добавки до 115 мин при расходе 14% добавки. В то же время разница между началом и концом схватывания практически не зависела от количества введенной добавки и составляла 20 мин.

Определение сроков схватывания обычными методами на приборе Вика не дает полного представления о скорости схватывания композиции из-за образования пленки на поверхности образца. Более точное значение скорости схватывания можно получить методом определения практической прочности с помощью конического пластометра. Измерения пластической прочности производили в начальный период (40 мин) через каждые 10 мин, затем через 15 мин. В качестве исследуемого состава была принята жидкостекольная матрица, состоящая из следующих компонентов: жидкого стекла 32,6%; феррохромового шлака 8,15%; тонкомолотого кварца 59,25% при модуле жидкого стекла 3,01 и плотности 1,42 г/см^3. Количественное влияние расхода К определяли на составах, содержащих 0; 5; 7 и 14% добавки К от массы жидкого стекла. Анализ результатов исследования показал (рис. 4), что повышение количества добавки К значительно увеличивает индукционный период существования коагуляционной структуры. При взаимодействии жидкого стекла с феррохромовым шлаком сразу же идут параллельно процессы коагуляционного и кристаллизационного структурообразования. После начала затворения смесь представляет собой сравнительно грубодисперсную суспензию, в которой протекают процессы, приводящие к образованию коагуляционной структуры. Пластическая прочность на этой стадии очень невелика. Молекулы введенной добавки К предотвращают рост или агрегирование тонкодисперсных частиц. Однако через некоторое время вся введенная добавка адсорбционно связывается и перестает оказывать влияние на дальнейшие процессы структурообразования. В результате наступает такой мо-

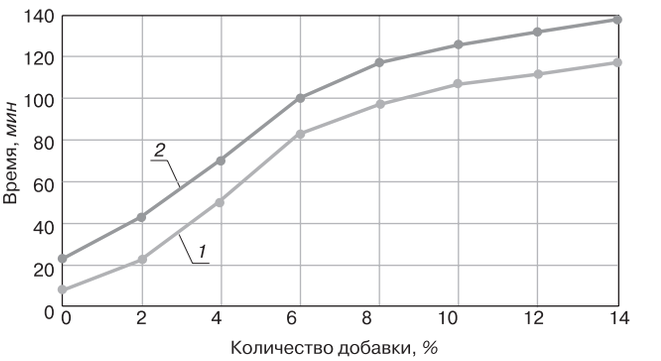

Рис. 3. *Зависимость сроков схватывания от количества К: 1 - начало схватывания; 2 – конец схватывания*

Fig. 3. *Dependence of setting time on the amount of K: 1 - beginning of setting; 2 - end of setting*

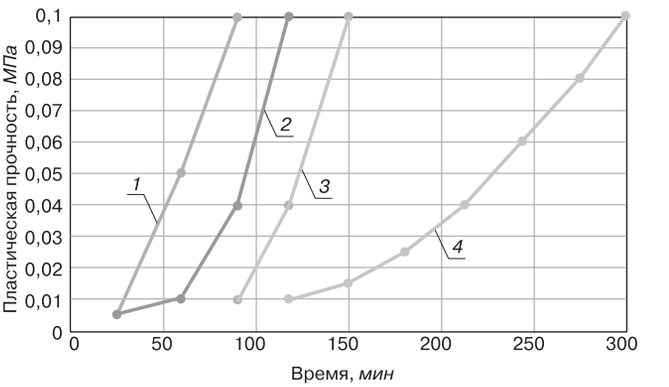

Рис. 4. *Изменение пластической прочности ЖСВ, модифицированного добавкой К, во времени: 1 – эталон; 2 – 5%К; 3 – 7%К; 4 – 14%К*

Fig. 4. *Change in the plastic strength of liquid-glass binder modified with K additive over time: 1 – reference; 2 – 5%K; 3 – 7%K; 4 – 14%K*

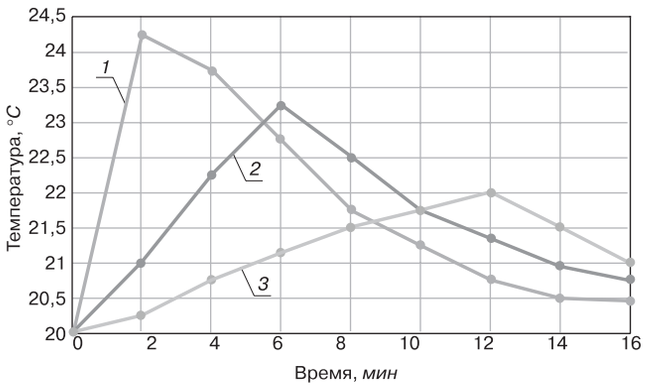

Рис. 5. *Кинетика тепловыделения твердеющей смеси, включающей жидкое стекло, феррохромовый шлак, тонкомолотый кварц и добавку К: 1 – эталон; 2 – 7% добавки; 3 – 14% добавки*

Fig. 5. *Kinetics of heat release of a hardening mixture, including water glass, ferrochrome slag, finely ground quartz and additive K: 1 – reference; 2 – 7% добавка; 3 – 14% добавка*

Рис. 6. *Реконструкция РКК на космодроме Байконур*

Fig. 6. *Reconstruction of the rocket and space complex at the Baikonur cosmodrome*

мент, когда вся добавка К будет связана. Этот момент совпадает с резким нарастанием прочности структуры матрицы. Резкий набор прочности происходит тем позднее, чем выше концентрация добавки в системе.

Кристаллизационные структуры возникают в процессе образования новой фазы, когда начинается срастание множества мелких кристалликов, выделяющихся из пересыщенного раствора в плотный кристаллический сросток. Указанная добавка адсорбируется на поверхности в основном выступающих частей кристаллов, препятствуя их непосредственному соединению между собой.

Изучение тепловыделения твердеющей композиции, включающей жидкое стекло, феррохромовый шлак, тонкомолотый кварц и добавку К, позволило установить влияние К на формирование структуры матрицы (рис. 5). Эталонный образец без добавки К в начальный период интенсивно выделяет тепло, затем тепловыделение снижается. Это объясняется следующим образом: начальный этап, когда взаимодействие протекает в водном растворе жидкого стекла, характеризуется наличием развитой поверхности компонентов, большим количеством энергетических связей и увеличенным тепловыделением в начале процесса твердения. На следующем этапе начинается образование продуктов реакции, которые препятствуют быстрому протеканию реакции. На последнем этапе происходит процесс постепенного превращения пластичной смеси в камнеподобное тело. Далее реакции происходят в твердом теле, где их скорости малы [3].

Тепловыделение для составов с 7% и 14% добавки К не столь интенсивно в первый период, процесс растянут во времени, максимумы достигаются через 5,5–10 ч. Следовательно, процесс формирования структуры материала происходит более плавно по времени. Повышение количества К в матрице приводит к снижению тепловыделения. Кремнийорганическая жидкость, обволакивая продукты реакции, препятствует дальнейшему быстрому протеканию процесса твердения. С увеличением добавки максимумы на кривых снижаются и сдвигаются вправо, что свидетельствует о замедлении процесса структурообразования. Равномерное выделение тепла при твердении составов с добавкой К позволяет судить о возможности формирования более однородной, с меньшим внутренним напряжением структуры матрицы.

На основании проведенных исследований были разработаны составы жаростойкого бетона.

Целесообразность использования сухих строительных смесей (ССС) подтверждена зарубежной и российской практикой. Применение ССС позволяет оптимизировать затраты на транспортировку материалов на объект, повысить производительность труда и качество производства работ, эффективно используя средства малой механизации. Кроме

Рис. 7. *Подготовка к старту ракетоносителя «Энергия»*
Fig. 7. *Preparation for the launch of the Energia carrier rocket*

того, применение ССС позволяет снизить влияние климатических условий на темпы и качество строительства.

Способ ССС применялся на космодроме Байконур, при реконструкции пусковых сооружений. В 26-м ЦНИИ МО РФ были разработаны жаростойкие составы бетонов для теплозащитных покрытий (ТЗП) стартовых сооружений (СС).

Предварительные производственные испытания дали возможность отработать и принять следующую технологию бетонирования ТЗП жаростойким бетоном на жидкостекольном связующем. В самом начале в расходные контейнеры дозировались сухие составляющие бетона: тонкомолотый шамот, шамотный песок и щебень, а также феррохромовый шлак.

Требуемое в смену количество расходных контейнеров складировалось на реконструируемой площадке в непосредственной близости от бетоносмесителя принудительного перемешивания. Загрузка составляющих осуществлялась в последовательности: вначале подавался расходный контейнер с сухими составляющими, после минутного перемешивания добавляли жидкое стекло с добавкой К – замедлителя схватывания и перемешивали 2 мин. Из бетоносмесителя смесь подавали в пневмобетононасос и далее в бетонируемую конструкцию. Темп бетонирования сооружения составлял 20–25 м^3 в сутки.

Укладка бетонной смеси в густоармированную конструкцию газорассекателяя пусковых сооружений (рис. 6) производилась при температуре наружного воздуха от +10°С до +30°С как с использованием бетононасоса, так и методом «кран-бадья», уплотнение – навесными и глубинными вибраторами. При этом подвижность бетонной смеси составляла 20–25 см осадки конуса (ОК), а жизнеспособность – до 60 мин. Качество уложенного бетона и его прочностные характеристики соответствовали заданным требованиям. Суммарный объем жаростойкого бетона, уложенного в сооружения, составил 800 м^3.

Штатный запуск ракетоносителя, проведенный впоследствии с реконструируемого сооружения, подтвердил требуемое качество теплозащитного покрытия (рис. 7).

Таким образом, проведенные исследования позволили получить модифицированный жаростойкий бетон с улучшенными технологическими характеристиками на жидком стекле с добавкой К – замедлителем схватывания, шамотном заполнителе и отвердителе – феррохромовом шлаке, что дало возможность осуществить качественную укладку бетонной смеси в густоармированную конструкцию конуса-газорассекателя без снижения требуемых прочностных и огнестойких характеристик бетона [3]. Опытно-промышленная апробация добавки К – замедлителя схватывания жаростойкой бетонной смеси на ЖСВ позволила получить ее приведенные характеристики:

– осадка конуса бетонной смеси 21 см;

– сроки схватывания смеси (при t° = 22°С) – 56 мин;

– прочность при сжатии в сроки: 3 сут – 19,3–21,4 МПа; 7 сут – 26,4–27,7 МПа; 28 сут – 29,1–32,3 МПа.

Список литературы

1. Тарасова А.П. Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе. М.: Стройиздат, 1982. 133 с.
2. Ребиндер П.А. Влияние смазочных сред на деформирование сопряженных поверхностей трения в кн.: О природе трения твердых тел. Минск: Наука и техника, 1971. С. 8–20.
3. Ремнёв В.В. Перспективные вяжущие для жаростойких бетонов // *Строительные материалы*. 1995. № 10. С. 2–5.

References

1. Tarasova A.P. Zharostoikie vyazhushchie na zhidkom stekle i betony na ikh osnove [Heat-resistant binders on liquid glass and concretes based on them]. Moscow. Stroyizdat. 1982. 133 p.
2. Rebinder P.A. Vliyanie aktivnykh smazochnykh sred na deformirovanie sopryazhennykh poverkhnostei treniya. O prirode treniya tverdykh tel [The influence of active lubricating media on the deformation of mating friction surfaces. On the nature of friction of solids]. Minsk. Nauka i tekhnika. 1971, pp. 8–20.
3. Remnev V.V. Promising binders for heat-resistant concrete. *Stroitel'nye materialy [Building materials]*. 1995. No. 10, pp. 2–5. (In Russian).