

**Исследование жаростойкости и термостойкости бетона
на пористых заполнителях и заполнителях из плотных горных
пород**

Мищенко Е. С., Яцкевич А. В.

Научный руководитель – Бондарович А.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Сопротивление бетона кратковременному воздействию огня в случае пожара называют его огнестойкостью. Жаростойкость же бетона представляет собой стойкость бетонов при постоянном и длительном воздействии высокой температуры при эксплуатации различных тепловых агрегатов (бетон жароупорный).

Из-за относительно низкой теплопроводности бетона непродолжительное действие высоких температур не вызывает достаточного нагревания бетона, а также арматуры, которая находится под защитным слоем. Гораздо опаснее является поливание холодной водой сильно разогретого бетона (к примеру, при тушении пожара). При этом холодная вода вызывает образование трещин, нарушение защитного слоя, а также обнажение арматуры при не прекращающемся воздействии высоких температур.

В зависимости от степени огнеупорности различают жаростойкие бетоны: высокоогнеупорные — с огнеупорностью выше 1770°С, огнеупорные — от 1580 до 1770°С, жароупорные — 1580°С.

Дополнительные требования к заполнителям для жаростойких бетонов состоят в следующем. Заполнители не должны разрушаться или размягчаться при длительном воздействии высоких температур, а также не должны вызывать появление больших внутренних напряжений в бетоне при нагревании.

При температуре эксплуатации до 600...800°С в качестве заполнителей могут применяться бескварцевые горные породы (диорит, андезит, базальт, диабаз), доменные шлаки, кирпичный бой, природные пористые заполнители вулканического происхождения, искусственные пористые заполнители (аглопорит, керамзит, вспученные перлит и вермикулит, шлаковая пемза и т. п.).

Для эксплуатации при температуре до 1200...1700°С жаростойкие бетоны готовят с использованием в качестве заполнителей дробленого боя огнеупорных материалов (шамотный кирпич, обожженный каолин, магнезит, хромит, корунд и др.).

Материалы для бетона

Вязущее – шлакопортландцемент, с содержанием доменного гранулированного металлургического шлака не более 40% по массе.

Рекомендуется ШПЦ М500 (ГОСТ 10178) либо СЕМ III А 42,5N (СТБ EN 197-1).

Допускается (с сохранением жаростойкости, но с допускаемым снижением прочности): ШПЦ М400 (ГОСТ 10178) либо СЕМ III А 32,5N (СТБ EN 197-1).

Заполнители для тяжелого бетона – щебень и дробленый песок из базальта. Базальтовый щебень – фр. 5...10 мм (ГОСТ 8267); фр. 6...12 мм (СТБ EN 12620). Базальтовый песок – фр. до 5 мм (ГОСТ 8736); фр. до 6 мм (СТБ EN 12620), модулем крупности ($M_k \geq 2,0$).

Заполнители для «облегченного» бетона. Керамзитовый песок по ГОСТ 25137 (производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль») средней насыпной плотностью: $\rho_{п.к.}^0 \sim 600-650 \text{ кг/м}^3$, фракция 0/4 мм. Щебень гранитный (РУПП «Гранит», г. Микашевичи) фракции: 5...10 мм (ГОСТ 8267); 6...12 мм (СТБ EN 12620).

Вода для затворения бетона (ГОСТ 23732; СТБ ГОСТ Р 51593; СТБ 1114).

Химические добавки. Пластификаторы I-ой группы (СТБ 1112). Рекомендуется: «Реламикс ПК» (ТУ ВУ 190679156.002-2013); допускается: «Стахемент 2000М» (ТУ ВУ 800013176.004-2011); «Sika Visco Crete 3180» ТУ 2493-009-13613997-2011.

Ускоритель твердения – сульфат натрия кристаллизационный (Na_2SO_4 ; ГОСТ 6318; безводный).

Микрокремнезем (минеральная добавка для повышения жаростойкости, плотности, прочности). Рекомендуется: МК – 85 (ТУ 5743-048-02495332-96); допускается: МКУ – 85 (уплотненный).

Фибра металлическая ФСВ-А-0.60/30 (ОАО «БМЗ»).

Аглопоритовый щебень по ГОСТ 25137, средней насыпной плотностью: $\rho_{п.к.}^0 \sim 800-850 \text{ кг/м}^3$, фракция 5/10 мм.

Составы бетона жаростойкостью класса не ниже «ИЗ» (температура применения ~ 300°С).

Состав тяжелого бетона на базальтовых заполнителях.

Класс бетона не ниже С 35/45 по прочности на сжатие (СТБ 1544) при твердении в нормально-влажностных условиях (осадка конуса бетонной смеси: ОК ≥ 21 см, марка П5).

Расход материалов на 1 м³ бетона представлен в табл.1.

Таблица 1. Состав тяжелого бетона на базальтовых заполнителях

Компоненты бетонной смеси	Расход, кг
- шлакопортландцемент М500 (М400)	450 (500)
- базальтовый щебень (фр. 5...10 или 6...12)	1000
- базальтовый песок (крупностью до 5 или 6 мм)	1000 (950)
- микрокремнезем	13,5 (15)
- вода (из расчета $(В/Ц)_6 \leq 0,3$)	139 (154)
- пластификатор (по сухому веществу от массы цемента от 0,3% до 1%, в зависимости от обеспечиваемой подвижности бетонной смеси)	1,4...4,6
- ускоритель твердения (1% от МЦ)	4,5 (5,0)
Средняя плотность: ~ 2600 кг/м ³ и более, учитывая более высокую плотность базальтовой породы, в сравнении с гранитоидной.	

Примечание 1. При дозировке пластификатора в виде жидкости (традиционно 30% концентрации), ее расход составляет: например, 1,4:0,3 ~ 4,7 кг, с содержанием воды: 4,7 – 1,4 ~ 3,3 литра, которые следует вычесть из воды затворения: 139 – 3,3 ~ 136 кг (л).

Примечание 2. Рекомендуется введение фибры металлической в количестве 40 кг на 1 м³ бетона.

Состав «облегченного» бетона на гранитном (допускается) либо базальтовом (рекомендуется) щебне и керамзитовом песке.

Класс бетона не ниже С 28/35 (СТБ 1544) при твердении в нормально-влажностных условиях (осадка конуса бетонной смеси: ОК = 15...20 см (марка ПЗ-П4)).

При большой осадке конуса может проявиться расслоение бетона, и его укладка требует обязательного соблюдения равномерной подачи-распределения при высоте слоя не более 300...400 мм.

Расход материалов на 1 м³ бетона представлен в табл.2.

Таблица 2. Состав «облегченного» бетона

Компоненты бетонной смеси	Расход, кг
шлакопортландцемент М500 (М400)	450 (500)
гранитный (базальтовый) щебень	1000
песок керамзитовый ($\rho_0 \sim 600 \dots 650 \text{ кг/м}^3$)	340
микрокремнезем	13,5 (15)
вода (из расчета «истинного» водоцементного отношения бетона: $(В/Ц)_и \sim 0,3$)	270
пластификатор ($D \sim 0,7\%$ от МЦ р-ра 30% концентрации для подвижности: ОК $\sim 15\text{см}$)	3,15
ускоритель твердения (1% от МЦ, при необходимости)	4,5 (5,0)
Средняя плотность: $\sim 2100 \text{ кг/м}^3$	

Примечание 1. Истинное водоцементное отношение определяется без учета количества воды, поглощенной (и удерживаемой в начальный период) керамзитовым (пористым) заполнителем.

Расход воды на замес «номинальный» т.к. зависит от фактических свойств пористого заполнителя. Требуемую осадку конуса следует обеспечивать не за счет увеличения расхода воды, а увеличивая расход пластификатора.

Примечание 2. Рекомендуется введение фибры металлической в количестве 40 кг на 1 м³ бетона.

Состав легкого аглопоритобетона на аглопоритовом щебне и керамзитовом песке.

Класс бетона не ниже С 25/30 (СТБ 1544) при твердении в нормально-влажностных условиях (осадка конуса бетонной смеси: ОК ≥ 21 см (марка П5)).

Расход материалов на 1 м³ бетона представлен в табл.3.

Таблица 3. Состав легкого аглопоритобетона

Компоненты бетонной смеси	Расход, кг
шлакопортландцемент М500 (М400)	450 кг; (500 кг);
аглопоритовый щебень (фр. до 10 мм)	450 кг;
песок керамзитовый	310 кг;
микрокремнезем	3,5 (15) кг;
вода ((В/Ц) _{ист} ~ 0,3)	310 кг;
пластификатор (р-р 30%; Д ~1,0% от МЦ)	4,2 кг;
ускоритель твердения (1,5% от МЦ, при необходимости)	6,75 (7,5) кг.
Средняя плотность: ~ 1500÷1600 кг/м ³	

Примечание 1. Расход воды соответствует ранее приведенному.

Примечание 2. Рекомендуется введение фибры металлической в количестве 40 кг на 1 м³ бетона.

Результаты оценки жаростойкости и термостойкости бетона по ГОСТ 20910.

Жаростойкость бетона определяли по состоянию внешнего вида и остаточной прочности после нагрева до ~ 350°C (для класса «И 3» температура не ниже 300°C) образцов (70x70x70 мм), после 7 суток их твердения в нормально-влажностных условиях ($t \sim 20^\circ\text{C}$; $\varphi \geq 90\%$) и предварительной сушки 48 ч при $t = 105 \pm 5^\circ\text{C}$ и их последующего выдерживания 7 суток над водой. «Остаточная» прочность по ГОСТ 20910 должна быть не ниже 80% от «начальной».

Результаты испытаний без переводного коэффициента приведены в таблице 4.

Термостойкость бетона (до $t = 300^\circ\text{C}$ определяли путем нагрева образцов (в течение 40 мин. при $t \sim 300^\circ\text{C}$) с последующим погружением их в воду ($t \sim 15^\circ\text{C}$) на 5 мин. Затем образцы в течение 10 мин. «обсыхали» и циклы повторяли многократно.

Кроме этого, по той же методике, но не с погружением образцов в воду, а с погружением одной грани имитировали ожидаемые условия эксплуатации бетона.

По ГОСТ 20910 оценивали: внешний вид (наличие и характер трещин) и потери массы образцов (допускается до 20% от начальной). Результаты приведены в таблице 5.

Таблица 4. Определение жаростойкости бетона

Вариант (вид) бетона	Наличие фибры металлической	Внешний вид (наличие трещин)	Прочность бетона начальная, МПа	Прочность после испытаний (остаточная), МПа	Снижение прочности, %
Тяжелый (базальтовые заполнители)	без	отсутствуют	43,4	40,8	6,4
Облегченный (щебень гранитный, песок керамзитовый)	без		37,7	35,8	5,3
	с фиброй		38,5	36,7	4,9
Легкий аглопоритобетон (щебень аглопоритовый, песок керамзитовый)	без		28,2	27,0	4,4

Вывод: Все запроектированные составы обеспечивают жаростойкость класса «И 3»

Таблица 5. Определение термостойкости бетона (исследования продолжаются)

Вариант (вид) бетона	Наличие фибры мetailлической	Максимально нормированное количество «термоциклов» по ГОСТ 20910	Фактическое количество «термоциклов»	Снижение массы, %	Марка по термостойкости
Тяжелый (базальтовые заполнители)	без	40	30	18,1	T30
Облегченный (щебень гранитный, песок керамзитовый)	без		60	Без снижения (по настоящее время)	Испытания продолжаются
	с фиброй		60		
Легкий аглопоритобетон (щебень аглопоритовый, песок керамзитовый)	без	30			

Особенности технологии приготовления бетона и ведения работ.

Приготовление бетона

Тяжелый бетон, последовательность загрузки компонентов: щебень, песок, микрокремнезем, цемент, вода (50...60 %), химические добавки с водой затворения (50...40 %), фибра.

Облегченный бетон: щебень, микрокремнезем, песок керамзитовый, вода (50...60 %), цемент, химические добавки с водой затворения (50...40 %), фибра.

Легкий аглопоритобетон: щебень, песок керамзитовый, вода (50...60%), микрокремнезем, цемент, химические добавки с водой затворения (50...40%), фибра.

Во всех случаях фибру вводить равномерно через сито из комплекта ситового анализа заполнителей; диаметр отверстий подобрать (10...40 мм).

Подача, укладка, уплотнение бетона

Подача – рекомендуется не более 30 мин. после приготовления. При большом периоде отследить изменение «ОК» и, при необходимости увеличить дозировку пластификатора в пределах (указаны в п.2, состав тяжелого бетона).

Укладка – последовательно, примерно равным слоем в плане, при высоте слоя до 400 мм.

Уплотнение – штыкованием, до оседания бетона; для «ОК» ≤ 15 см. и при наличии возможности – глубинным вибратором с кратковременным (3...5 с.) включением.

Заключение

Все предложенные составы обеспечили жаростойкость класса «И 3», т. е. обеспечивают жаростойкость не менее 300°C.

Учитывая наличие в Беларуси щебня гранитного и песка керамзитового, следует считать основным составом – облегченный бетон на указанных материалах.

Термостойкость тяжелого конструкционного бетона на базальтовых заполнителях, оказалась меньше чем на других испытанных составах, содержащих керамзитовый песок, включая бетон с гранитным щебнем (облегченный состав).

Показатель термостойкости (эксперименты продолжаются) превысил максимально нормируемую марку по ГОСТ 20910 - «Т40».