

ТЕРМОСТОЙКОСТЬ И ЖАРОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА

Бондарович А. И.

ВВЕДЕНИЕ

Сопrotивление бетона кратковременному воздействию огня называют его огнестойкостью. Жаростойкость же бетона представляет собой способность выдерживать без разрушения постоянное и длительное воздействие высокой температуры при эксплуатации различных тепловых агрегатов (бетон жароупорный). В целом бетон относят к классу огнестойких материалов.

Из-за относительно низкой теплопроводности бетона непродолжительное действие высокой температур не вызывает критического нагревания бетона, а также арматуры, которая находится под защитным слоем. Гораздо опаснее является полив холодной водой сильно разогретого бетона, что вызывает образование трещин, нарушение защитного слоя, а также обнажение арматуры при непрекращающемся воздействии высоких температур.

Бетон на портландцементе при длительном действии высокой температуры (более 250 °С) является не пригодным к эксплуатации. Известно, что при нагревании обычного бетона от 250 °С до 300 °С происходит разложение гидрата окиси кальция, сопровождающееся, снижением прочности, а также нарушением структуры цементного камня. Под воздействием температур выше 550 °С, содержащиеся в гранитном щебне и в песке зерна кварца начинают растрескиваться, поскольку при таких температурах кварц переходит в иную модификацию (тридимит). Растрескивание обусловлено увеличением объема кварцевых зерен и образованием микротрещин в тех местах, где цементный камень соприкасается с зернами заполнителя. С последующим увеличением температуры начинают разлагаться кристаллогидраты клинкерных минералов цементного камня и происходит разрушение структуры «стандартного» цементного бетона [1].

Результатами исследований, отраженных в настоящей статье, решалась задача разработки ремонтно-восстановительных составов бетона для участка охлаждения металлических отливок в производственном процессе получения стали на Белорусском металлургическом заводе в г. Жлобине. Согласно техническому заданию, было необходимо разработать экономичный, основывающийся на отечественных материалах бетон, обеспечивающий жаростойкость в пределах «+300 °С», т. е. класс «ИЗ». В процессе эксплуатации ограждающих этот участок конструкций бетон подвергается как нагреву до 300 °С, так и охлаждающему воздействию воды – в жидкой среде и в виде острого перегретого пара. В этой связи следовало оценить и обеспечить термическую устойчивость бетона, т. е. способность сопротивляться циклическому нагреву до «рабочей» температуры и резкому жидкостному охлаждению.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БЕТОНА

В исследованиях использовались материалы со следующими характеристиками.

Вяжущее – шлакопортландцемент ШПЦ М500 (ГОСТ 10178) либо СЕМ III А 42,5N (СТБ EN 197-1), с содержанием доменного гранулированного металлургического шлака не более 40 % по массе.

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), модулюм 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: $\rho_{пк}^0 \sim 600-650 \text{ кг/м}^3$, 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:

пластификатор I-й группы (СТБ 1112) – «Реламикс ПК» (ТУ ВУ 190679156.002-2013);

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

Микрокремнезем – минеральная добавка для повышения жаростойкости, плотности, прочности, МК – 85 (ТУ 5743-048-02495332-96).

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

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

СОСТАВЫ ИССЛЕДУЕМОГО БЕТОНА ЖАРСТОЙКОСТЬЮ КЛАССА НЕ НИЖЕ «ИЗ» (температура применения до 300 °С).

Состав тяжелого бетона на базальтовых заполнителях.

Класс бетона по прочности на сжатие - не ниже С 35/45 (СТБ 1544) при твердении в нормально-влажностных условиях (осадка конуса бетонной смеси: $\text{OK} \geq 21 \text{ см}$, марка П5).

Расход материалов на 1 м^3 бетона:

- | | |
|---|------------------|
| - шлакопортландцемент М500 | – 450 кг; |
| - базальтовый щебень (фр. 5... 10 или 6... 12) | – 1000 кг; |
| - базальтовый песок (крупностью до 5 или 6 мм) | – 1000 (950) кг; |
| - микрокремнезем | – 13,5 (15) кг; |
| - вода (из расчета $(\text{В/Ц})_{\text{с}} \leq 0,3$) | – 139 (154) кг; |
| - пластификатор (по сухому веществу от массы цемента от 0,3% до 1%, в зависимости от обеспечиваемой подвижности бетонной смеси) | – 1,4... 4,6 кг; |
| - ускоритель твердения (1% от МЦ) | – 4,5 (5,0) кг. |

Средняя плотность: $\sim 2600 \text{ кг/м}^3$ и более, учитывая более высокую плотность базальтовой породы, в сравнении с гранитоидной.

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

Примечание 2. Введение фибры металлической в количестве 40 кг на 1 м^3 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: $\text{OK} = 15... 20 \text{ см}$ (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 м^3 бетона:

- | | |
|---|-----------------|
| - шлакопортландцемент М500 | – 450 кг; |
| - гранитный щебень | – 1000 кг; |
| - песок керамзитовый ($\rho^o \sim 600... 650 \text{ кг/м}^3$) | – 340 кг; |
| - микрокремнезем | – 13,5 (15) кг; |
| - вода (из расчета «истинного» водоцементного отношения бетона: $(\text{В/Ц})_{\text{и}} \sim 0,3$) | – 270 кг; |
| - пластификатор (Д–0,7% от МЦ р-ра 30% концентрации для подвижности: $\text{OK} \sim 15 \text{ см}$) | – 3,15 кг; |
| - ускоритель твердения (1% от МЦ, при необходимости) | – 4,5 (5,0) кг. |

Средняя плотность: $\sim 2100 \text{ кг/м}^3$.

Примечание 1. Истинное водоцементное отношение определялось без 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 обеспечивали не за счет увеличения расхода воды, а увеличивая расход пластификатора.

Примечание 2. Введение фибры металлической в количестве 40 кг на 1 м^3 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: $\text{OK} \geq 21 \text{ см}$ (марка П5)).

Расход материалов на 1 м^3 бетона:

- | | |
|----------------------------|-----------|
| - шлакопортландцемент М500 | – 450 кг; |
|----------------------------|-----------|

- аглопоритовый щебень (фр. до 10 мм)	- 450 кг;
- песок керамзитовый	- 310 кг;
- микрокремнезем	- 13,5 (15) кг;
- вода ((В/Ц) _н ~ 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/м³.

Примечание 1. Расход воды соответствует ранее приведенному

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

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Бетонную смесь готовили в лабораторной мешалке принудительного действия; время перемешивания компонентов составляло 3 минуты; образцы изготавливали в поверенных формах, соответствующих требованиям ГОСТ 22685; укладывали и уплотняли бетонную смесь штыкованием и кратковременным вибрированием ($A=0,5$ мм; $f=50$ Гц) не позднее, чем через 20 мин. после приготовления.

Образцы после изготовления до распалубки хранили в нормально-влажностных условиях (температура - 20 ± 3 °С и относительная влажность воздуха - 90 ± 5 %).

После распалубливания образцы были помещены в камеру, обеспечивающую у поверхности образцов нормальные условия твердения. Образцы укладывали на подкладки так, чтобы расстояние между образцами, а также между образцами и стенками камеры было не менее 5 мм. Площадь контакта образца с подкладками, на которых он установлен, составляла не более 30 % площади опорной грани образца.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОНА

Тяжелый бетон. Последовательность загрузки компонентов: щебень, песок, микро-кремнезем, цемент, вода (50...60 %), химические добавки с водой затворения (50...40 %), фибра.

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

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

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

ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Плотность бетона – определяли в соответствии с ГОСТ 12730.1-78 испытанием образцов в состоянии естественной влажности. Объем образцов правильной формы вычисляли по их геометрическим размерам. Размеры образцов определяли штангенциркулем с погрешностью не более 1 мм по методике ГОСТ 10180-78. Массу образцов определяли взвешиванием с погрешностью не более 0,1 %. Плотность бетона образца вычисляли с погрешностью не более 0,1 %. Количество испытываемых образцов каждого состава по 3 образца, размером 100x100x100 мм. Плотность бетона серии образцов вычисляли как среднее арифметическое значение результатов испытания всех образцов серии.

Прочность бетона на сжатие в проектном и промежуточном возрасте определяли после соответствующих режимов твердения и сушки:

- выдержка – в течение 7 суток (температура - 20 ± 3 °С и относительная влажность воздуха - 90 ± 5 %);

- сушка – в течение 48 часов (температура - 105 ± 5 °С);

- остывание - в течение 4 часов.

Для определения прочности на сжатие в проектном возрасте, после вышеуказанных режимов выдержки и сушки, образцы помещались в нормально влажностные условия твердения (температура - 20 ± 3 °С; относительная влажность воздуха - 90 ± 5 %) до достижения проектного возраста.

Для установления остаточной прочности (жаростойкости) образцы бетона после вышеуказанного температурно-влажностного режима твердения и сушки подвергали нагреву до 350 °С (при заявленной в задании - 300 °С) в камерной электрической печи со скоростью подъема температуры 150 °С/ч, выдерживали при требуемой температуре 4 ч, после чего образцы остывали вместе с печью до комнатной температуры.

После остывания образцы бетона помещали на сетчатый стеллаж, расположенный в ванне над водой. Слой воды в ванне был не менее 10 см. Расстояние от нижней поверхности образцов бетона до уровня воды и от верхней поверхности образцов до крышки ванны было (4 ± 1) см. Образцы выдерживали в ванне 7 сут., затем вынимали, осматривали и определяли прочность на сжатие по ГОСТ 10180.

При испытании на сжатие образцы-кубы устанавливали одной из выбранных граней на нижнюю опорную плиту пресса центрально относительно его продольной оси, используя риски, нанесенные на плиту пресса. После установки образца на опорные плиты пресса совмещали верхнюю плиту пресса с верхней опорной гранью образца так, чтобы их плоскости полностью прилегали одна к другой. Далее проводили нагружение образцов до разрушения.

Термостойкость бетона – способность образцов бетона выдерживать резкие смены температур от предельно допустимой температуры применения до 20°C для классов по предельно допустимой температуре применения бетонов (ИЗ–И7).

При исследовании термостойкости, образцы помещали в печь, предварительно разогретую до расчетной температуры, и выдерживали при этой температуре 40 мин. Колебания температуры в печи допускается в пределах $\pm 20^{\circ}\text{C}$. Время отсчитывали с момента, когда в печи устанавливалась необходимая температура. По истечении 40 мин образцы вынимали из печи и погружали в ванну вместимостью 10 л с водой комнатной температуры.

Образцы охлаждали в воде в течение 5 мин, после чего их вынимали из воды и выдерживали при температуре $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ в течение 10 мин. на воздухе. Затем нагревание повторяли. После каждой теплосмены воду в ванне меняли.

Число теплосмен, вызвавших разрушение образцов или потерю бетоном 20 % первоначальной массы, принимали за термическую стойкость бетона в водных теплосменах [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЖАРО- И ТЕРМОСТОЙКОСТИ БЕТОНА ПО ГОСТ 20910

Жаростойкость бетона определяли по состоянию внешнего вида и остаточной прочности после нагрева до $\sim 350^{\circ}\text{C}$ (для класса «И 3» температура не ниже 300°C) образцов размером $70 \times 70 \times 70$ 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 1.

Таблица 1 – Жаростойкость 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)	-	отсутствуют	43,4	40,8	6,4
Облегченный (щебень гранитный, песок керамзитовый)	-		37,7	35,8	5,3
	с фиброй		38,5	36,7	4,9
Легкий аглопоритобетон (щебень аглопоритовый, песок керамзитовый)	-		28,2	27,0	4,4

Термостойкость бетона (как было указано) 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, были проведены исследования термостойкости бетона при «частичном погружении» по вышеуказанной методике, но с погружением одной грани образцов в воду (имитация ожидаемых условий эксплуатации бетона на ОАО «БМЗ»).

По ГОСТ 20910 оценивали: внешний вид (наличие и характер трещин) и потери массы образцов (допускается до 20% от начальной). Результаты испытаний частично приведены в таблице 2.

Из полученных данных можно сделать следующие выводы.

Во-первых, состав тяжелого бетона на базальтовых заполнителях (в технической литературе рекомендуется для жаростойких бетонов оцениваемого класса «ИЗ») – подтверждена способность «работать» при $t \leq 300$ °С. Но при этом он оказался наименее термостойким, т. е. этот вариант состава не обеспечит долговременную эксплуатацию заявленных в задании на исследования конструкций.

Таблица 2 – Термостойкость бетона

Вариант (вид) бетона	Наличие фибры металлической	Максимально-нормированное количество «термоциклов» по ГОСТ 20910	Фактическое количество «термоциклов»	Снижение массы, %	Марка по термостойкости
Тяжелый (базальтовые заполнители)	-	40	30	18,1	Т30
Облегченный (щебень гранитный, песок керамзитовый)	-		260*		
	с фиброй		260*	Без снижения	Более Т40
Легкий аглопоритобетон (щебень аглопоритовый, песок керамзитовый)	-	260*			

* - эксперимент остановлен

Во-вторых, подтвердилась рабочая гипотеза, согласно которой высокую термостойкость может обеспечить высокодеформативный легкий бетон на пористых заполнителях (аглопоритобетон), а также «облегченный» бетон [3]. В последнем случае растворная (высокодеформативная и характеризующаяся низкой теплопроводностью) керамзито-цементная составляющая надежно блокировала крупный заполнитель – гранитный щебень. Их совместная работа обеспечивает бетону достаточно высокую прочность (класс С 25/30... С 28/35), т. е. способность сопротивляться механическим воздействиям и, как показали исследования, высокую термостойкость.

В-третьих, достаточно эффективно введение в бетон металлической фибры. Ее эффект проявился в ограничении раскрытия трещин после того, как они появились в процессе испытаний. Расширяясь на стадии нагрева (ограниченно в образцах с фиброй) они «закрывались» при охлаждении образцов в воде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все исследованные и приведенные в статье составы бетона обеспечили жаростойкость класса «И 3», т. е. обеспечивают возможность их использования в конструкциях при воздействии температуры до 300 °С.

Учитывая наличие и доступность в Республике Беларусь щебня гранитного и песка керамзитового, основным составом следует считать – «облегченный» бетон, приготовленный с их использованием.

Марка по термостойкости тяжелого конструкционного бетона на базальтовых заполнителях оказалась меньше, чем на других исследованных составах, в которых применялся керамзитовый песок, включая бетон с гранитным щебнем (облегченный состав).

Показатель термостойкости при нагреве аглопоритобетона и бетона «облегченного» состава до 300...350 °С и резком жидкостном (в воде) охлаждении превысил максимально нормируемую марку по ГОСТ 20910 – «Т40» более чем в 6 раз. Это предпосылка обеспечения достаточно высокой эксплуатационной надежности и долговечности устраиваемых (возводимых) из этих материалов строительных конструкций, эксплуатируемых в соответствующих условиях.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ковшар, С.Н. Изменение структурно-механических характеристик цементного камня при циклическом воздействии внешней среды / С.Н. Ковшар // Строительная наука и техника. – 2010. – № 1–2(28–29). – С. 60–63.

2. Бетоны жаростойкие. Технические условия: ГОСТ 20910-90 – Введ. 12.10.1990 – НИИЖБ Госстроя СССР, 1991 – 26 с.

3. Галузо, Г.С. Исследование прочности и деформации аглопоритобетона при действии статической и многократноповторяющейся сжимающих нагрузок: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Минск: БПИ, 1969. – 25 с.