

Ляхевич Генрих Деонисиевич, д-р техн. наук, профессор, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

Гречухин Владимир Александрович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

Мотамеди Сайед, магистрант, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА, АРМИРОВАННОГО ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫМИ ВОЛОКНАМИ

© РУП «Институт БелНИИС», 2020
Institute BelNIIS RUE, 2020

АННОТАЦИЯ

Целью настоящего исследования является исследование влияния полипропиленовых волокон, вводимых в бетонную смесь, на прочностные характеристики и снижение эффекта взрывного откалывания в бетоне, при повышении температуры.

Полипропиленовая фибра образует в бетоне трехмерный армирующий каркас, который воспринимает растягивающие усилия. Ее применение повышает долговечность, снижает истираемость поверхности, повышает ударную вязкость, устраняет усадку, предупреждает образование трещин, повышает морозостойкость.

Для приготовления бетонной смеси использовали следующие компоненты: цемент марки М-500, песок кварцевый, щебень, микрокремнезем, суперпластификатор, вода, полипропиленовая фибра. Водоцементное отношение в испытании составило от 0,23 до 0,32.

С целью изучения влияния температуры на прочностные характеристики высокопрочного бетона приготовили 16 составов бетонной смеси.

Образцы нагревали до температуры 800 °С при скорости нагрева около 20 °С в минуту. После достижения данной температуры образцы в течение 24 часов медленно остывали до комнатной температуры, после чего измерялось снижение их массы и остаточное сопротивление на сжатие. При нагревании образцов в интервале температур от 160 °С до 180 °С в бетоне с ППВ происходит образование каналов, по которым при дальнейшем нагревании выходит пар. Испытания показали, что в образцах с полипропиленовым волокном (ППВ) не наблюдается эффекта взрывного откалывания. Полипропиленовые волокна уменьшают потерю сопротивления, и устраняют хрупкое разрушение.

В исследовании изучено влияние длины и количества ППВ на прочность бетона на сжатие. Использование полипропиленовых волокон повышает огнестойкость и хрупкость высокопрочного бетона, способствует его вязкому разрушению.

Образцы бетона без ППВ после нагружения полностью разрушились, тогда, как образцы бетона с ППВ при аналогичной нагрузке сохранили свою геометрию.

Введение волокна в высокопрочный бетон способствует повышению прочности на сжатие и термостойкости образцов. После расплавления волокон, образовались капилляры, через которые пар может выйти из массива бетона, предотвращая, таким образом, взрывное откалывание бетона.

Ключевые слова: бетон, полипропиленовые волокна, термостойкость, взрывное откалывание, огнестойкость.

Для цитирования: Ляхевич, Г. Д. Физико-механические свойства высокопрочного бетона, армированного полипропиленовыми волокнами / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин, Н. Мотамеди // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2020. – Вып. 12. – С. 131-152. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2020-12-09>.

Genrikh Lyakhevich, DsC in Engineering Science, Professor, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

Vladimir Grechukhin, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

Syed Motamedi, Master's Student, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF HIGH-STRENGTH CONCRETE REINFORCED WITH POLYPROPYLENE FIBERS

ABSTRACT

The purpose of this study is to study the effect of poly-propylene fibers introduced into the concrete mix on the strength characteristics and reduction of the effect of explosive chipping in concrete when the temperature increases.

Polypropylene fiber forms a three-dimensional reinforcing frame in concrete that accepts tensile forces. Its use increases durability, reduces surface abrasion, increases impact strength, eliminates shrinkage, prevents the formation of cracks, and increases frost resistance.

The following components were used to prepare the concrete mix: M-500 cement, quartz sand, crushed stone, microsilon, superplasticizer, water, polypropylene fiber. The water-cement ratio in the test was from 0.23 to 0.32.

In order to study the effect of temperature on the strength characteristics of high-strength concrete, 16 concrete mix compositions were prepared.

The samples were heated to a temperature of 800 °C at a heating rate of about 20 °C per minute. After reaching this temperature, the samples were slowly cooled to room temperature for 24 hours, after which the decrease in their mass and residual compressive resistance were measured. When samples are heated in the temperature range from 160 °C to 180 °C in concrete with PPV, channels are formed through which steam escapes

during further heating. Tests have shown that there is no explosive chipping effect in samples with polypropylene fiber (PPV). Polypropylene fibers reduce the loss of resistance, and eliminate brittle fracture.

The study examined the effect of the length and amount of PPV on the compressive strength of concrete. The use of polypropylene fibers increases the fire resistance and brittleness of high-strength concrete, contributes to its viscous destruction.

Samples of concrete without PPV after loading completely collapsed, while samples of concrete with PPV under a similar load retained their geometry.

The introduction of fiber into high-strength concrete increases the compressive strength and heat resistance of samples. After melting the concrete, capillaries were formed through which steam can escape from the concrete mass, thus preventing explosive chipping of the concrete.

Keywords: concrete, polypropylene fibers, heat resistance, explosive chipping, fire resistance.

For citation: Lyakhevich G., Grechukhin V., Motamedi S. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva vysokoprochnogo betona, armirovannogo polipropilenovymi voloknami* [Stress-strain behavior of high-strength concrete reinforced with polypropylene fibers]. In: *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 12. 2020. pp. 131-152. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2020-12-09> (in Russian).

ВВЕДЕНИЕ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Полипропиленовое фиброволокно впервые применено в бетоне в 70-х годах минувшего века в США как материал, предотвращающий образование микротрещин на дорожном полотне. Опыт был удачным, на бетонных участках с армированием перестали появляться трещины от перепада температур. Спустя десять лет полипропиленовое фиброволокно стало неотъемлемой частью строительной отрасли, в 80-х годах во многих европейских странах оно во многих конструкциях заменяет металлическую сетку. На территорию бывшего Союза технология, армирования с применением полипропиленового фиброволокна, пришла после 2000-го года. «Фибра» в

перевод с английского означает «волокно». Действительно, на вид это нити определенного диаметра и длины, изготовленные из различных материалов. В зависимости от материала, фибра для бетона делится на пять основных разновидностей: стальная; полимерная; базальтовая; стеклянная; полипропиленовая.

Полипропиленовая фибра – это один из наиболее распространенных видов армирующих волокон. Волокна из полипропилена формируют экструзией или вытягиванием и нарезают на отрезки разной длины от 6 до 40 мм. Фибра обладает значительной прочностью и упругостью, устойчива к агрессивным, в том числе, щелочным, средам и коррозии. Преимущество полипропиленовой фибры – ее легкость и большая площадь поверхности (в 1 кг полипропиленовой фибры около 1 миллиона волокон). В бетонных смесях фибру сочетают с различными добавками, например, пластификаторами и суперпластификаторами; ускорителями и др. Полипропиленовая фибра образует в бетоне трехмерный армирующий каркас, который воспринимает растягивающие усилия. Фибробетоны имеют следующие преимущества перед обычными бетонами: предотвращение расслаивания смеси; увеличение прочности на сжатие и растяжение при изгибе; повышение долговечности; снижение истираемости поверхности; повышение ударной вязкости; устранение усадки; предупреждение образования трещин; повышение устойчивости к морозу; увеличение водостойкости. Фибра очень легкий и экономичный материал. В зависимости от области применения дозировка фибры меняется: в железобетонных конструкциях используют бетон с добавлением фибры длиной 12 или 20 мм от 0,9 кг на 1 кубометр бетона. Эффективность фибры зависит от равномерности ее распределения в бетонной смеси, поэтому, при необходимости, возможно увеличение времени перешивания до 15 %. Фибра повышает долговечность бетонных конструкций. Следует также отметить, что ее цена ниже других армирующих материалов. Полимер не вступает в реакцию с компонентами бетонной смеси.

Особый научный и практический представляет интерес изучение поведения бетона, армированного полипропиленовыми волокнами, при воздействии высоких температур.

Hertz в ходе исследований изучал воздействие огня на бетоны. В двух сериях проведенных испытаний для уменьшения риска взрывного откалывания бетона изменялась температура, размеры цилиндрических образцов и процентное содержание стальных волокон [1].

Castillo и Durani изучали воздействие временных увеличений температуры на прочность высокопрочного и обычного бетона [2].

Felicetti и другие в 1996 году в ходе испытаний высокопрочного бетона изучили изменение его характеристик под воздействием огня. В испытании они использовали метод остаточного сопротивления для изучения характеристики бетона [3].

Phan и Carino в 2002 году в ходе лабораторной программы в Обществе стандартов и технологий США (NIST) изучили воздействие высокой температуры на механические характеристики и возможность появления взрывного откалывания в высокопрочном бетоне. В данном испытании исследовались механические характеристики цилиндрических образцов с высокой прочностью в условиях увеличения температуры до 600 °C [4].

Нап и другие с 2004 года изучали явление взрывного откалывания в бетонах с полипропиленовыми волокнами. Они использовали подбор состава бетонной смеси, вводя от 0,5 до 10 процентов волокна по объему. С увеличением количества полипропиленовых волокон в бетоне взрывное откалывание уменьшилось [5].

Behnood и Ziari в 2008 году изучили остаточное сопротивление высокопрочного бетона при увеличении температуры [6]. Sahmaran и другие в 2010 году изучили механические характеристики и микроструктуру поврежденного от воздействия температуры высокопрочного бетона [7].

Издание Франции «Строительство сегодня» приводит данные по вопросам безопасности использования бетонов. Они отмечают, что высокопрочный бетон (60–100 МПа), применяемый в Европе, при нагревании выше 200 °C подвержен взрывному откалыванию. И в качестве примера приводят пожар в тоннеле под Ла-Маншем, который показал, что такой бетон представляет угрозу для жизни и безопасности людей. Введенный в бетонную смесь полипропилен снимает эту проблему. Он плавится при

температуре 160–170 °С, в результате образуются капилляры, через которые перегретый пар выходит на поверхность. В настоящее время ППВ применяют для изготовления конструкций, при взрывном откалывании которых существует угроза жизни человека, например, в тоннелях и других конструкциях [8].

При повышении температуры от 100 до 200 °С в бетоне происходят сложные физико-химические процессы, начинает испаряться свободная вода, а при дальнейшем увеличении температуры освобождается и химическая вода. С учетом малой проницаемости высокопрочного бетона у пара нет возможности выйти из массива бетона, следовательно, с увеличением температуры давление внутри массива бетона возрастает. Давление водяного пара может достигать 8 МПа, что превышает сопротивление бетона на растяжение [9], в результате появляются трещины. В дальнейшем, при увеличении температуры накопившаяся энергия может внезапно освободиться и привести к взрывному откалыванию частиц бетона [10]. Из других причин взрывного откалывания бетона можно назвать увеличение внутренних температурных напряжений. В данном случае наружная поверхность бетона из-за прямого контакта с огнем и плохой проводимости имеет более высокую температуру по сравнению с внутренними слоями, и эта разность в температурах приводит к термическим напряжениям в бетоне [11]. Кроме этого, влияние оказывает разность коэффициентов температурных расширений компонентов бетона и разные изменения в фазах заполнителей, увеличивается вероятность увеличения растягивающих напряжений и трещинообразования.

Химическое разрушение цементного теста, происходящее при температуре 450 °С приводит к его сжатию. Гидроксид кальция, и карбонат кальция разлагаются в бетоне при температуре 550 °С, в результате их разложения создается окись кальция. Окись кальция при взаимодействии с влагой расширяется, что ускоряет разрушения бетона. Самый важный компонент цементного теста, от которого зависит прочность – это гель CSH «силикатная структура», которая разлагается при температуре 600 °С. В результате вышеописанных процессов, пористость бетона увеличивается, а прочность и твердость уменьшаются [12–14].

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Для приготовления высокопрочного бетона водоцементное отношение в испытании находилось в пределах 0,23–0,32. Гранулометрический состав заполнителя соответствует нормативным документам Республики Беларусь. Образцы изготавливали в стандартной опалубке размером 10×20 см.

Для приготовления бетонной смеси использовали следующие компоненты (таблица 1).

Таблица 1

Компоненты бетонной смеси

Наименование	Характеристики
цемент М-500 ОАО «Красносельскстройматериалы» ПЦ-ДО	– тонкость помола 96,5 %; – истинная плотность 3,1072 г/см ³ ; – удельная поверхность 3 406 см ² /г; – активность 51,4 МПа
песок кварцевый для строительных работ, ГОСТ 8736	– модуль крупности $M_k = 2,14$; – объем песка 33–45 %
щебень с максимальной крупностью зерен до 20 мм, марка щебня 1200, ГОСТ 8267	– плотность 2 692 кг/м ³ ; – влажность 0,16 масс. %; – содержание глинистых и пылеватых частиц – 0,12 масс. %
микрокремнезем марки МК-85 (ТУ5743-048-02495332), активирован при температуре 105–115 °С	– истинная плотность 2,2345 г/см ³ ; – удельная поверхность 21,86 м ² /г, в неуплотненном состоянии с насыпной плотностью 174 кг/м ³ ; – соотношение микрокремнезема 0–15 % от цемента
полипропиленовая фибра ВСМ-II-20/6 по ТУ 2272-006-1349727-2007. Волокно строительное микроармирующее, производства ООО «СИ-Айрлайн», Челябинск	– диаметр фибр – 20 мкм; – длина: 6, 12 и 18 мм; – прочность на разрыв – 350 МПа; – модуль упругости – 8 000 МПа; – содержание фибры в бетоне: 0,6 / 1,3 / 2,0 и 2,7 кг/м ³

Суперпластификатор – натриевая соль сульфоксидата ароматических углеводородов и конденсации с формальдегидом, тип 1 (НСАУКФ-1), получен на кафедре мостов и тоннелей БНТУ по следующей технологии: 1 масс. часть оксидата ароматического нефтепродукта – оксидата экстракта селективной очистки масел обработана 20 %-м олеумом в количестве 1 масс. части

в течение 60 мин при температуре 145 °С, реакционная масса обработана формальдегидом (формалином). Конденсация осуществлена при температуре 125 °С в течение 3 часов при атмосферном давлении, затем реакционную массу нейтрализовали 42,5 %-й гидроокисью натрия. Оксидат получен каталитическим окислением ароматических нефтепродуктов, например, экстракта селективной очистки масел, в присутствии 0,5–3,0 масс. % кальцинированной соды при температуре 110–220 °С, расход воздуха 5–8 л/(мин. кг) в течение 45–180 мин при атмосферном давлении. Характеристика суперпластификатора НСАУКФ-1: массовая доля сухих веществ – 62,9 %; плотность при 20 °С – 1,2761 г/см³; показатель активности водородных ионов – 8,24; вода водопроводная для затворения бетонных смесей, в соответствии с требованиями СТБ 1114.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ

В соответствии со стандартом ASTM C192 первоначально в бетономешалку загружали щебень и 20 % воды от расчетного количества. При перемешивании щебень равномерно увлажнялся водой. Затем при постоянном перемешивании в бетономешалку добавлялся песок, полипропиленовую фибру, предварительно обработанную суперпластификатором. После полного равномерного распределения волокон в смесь добавляли цемент, микрокремнезем и остаток воды. После добавления воды перемешивание продолжалось в течение трех минут, после этого выключалось оборудование. После трех минут ожидания перемешивание возобновлялось в течение двух минут. Затем приготовленная бетонная смесь заполнялась в формы и уплотнялась с помощью вибратора. Образцы изготовили в соответствии со стандартом ASTM C192. До набора проектной прочности образцы в течение 28 суток хранили в воде.

Свойства образцов исследовали в несколько этапов, с использованием различных составов, в кг/м³, (таблица 2).

Составы бетонной смеси

Наименование	Количество, кг/м ³
вода	150–170
цемент	487–568
крупный заполнитель	927–1 153
мелкий заполнитель	593–822
суперпластификатор	5–19
фибра полипропиленовая	0,6–2,7

Испытания образцов бетона проводили в соответствии с ТКП 45-1.01-221.

**ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА, АРМИРОВАННОГО
ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫМИ ВОЛОКНАМИ ПОСЛЕ НАГРЕВАНИЯ
ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 800 °С**

В области изучения воздействия высоких температур на бетон проведено много исследований. Основная масса исследований посвящена воздействию высоких температур на обычные бетоны. С начала 90-х годов и особенно в последнее время увеличилось количество исследований бетонов с высокими рабочими характеристиками.

С целью изучения влияния температуры на прочностные характеристики высокопрочного бетона приготовили 16 составов бетонной смеси, из которых изготовили серии образцов, которые затем испытали при температуре 800 °С. Для уменьшения эффекта взрывного откалывания, в некоторых образцах серий использовали ППВ. Испытания показали, что в образцах с ППВ не наблюдается эффекта взрывного откалывания.

Испытания проводили по следующей схеме. Один образец из каждой серии нагревали до температуры 800 °С, затем измеряли уменьшение его массы. Другой образец выдерживали при комнатной температуре. После этого проводили испытания прочности бетона на сжатие образцов, для которых было возможным проведение испытаний.

Использовали цилиндрические образцы размерами 10×20 см. После 28 суток набора прочности в воде образцы в течение 24 часов выдерживали в проветриваемом помещении для сушки поверхности. После сухие образцы взвешивали и помещали в электрическую печь (рисунок 1).

В соответствии с ISO 834, образцы нагревали до 800 °С при скорости нагрева около 20 °С в минуту. После достижения данной температуры образцы в течение 24 часов медленно остывали при комнатной температуре. После того как образцы остыли до комнатной температуры, измеряли снижение их массы и остаточную прочность на сжатие. Для уменьшения погрешности, вызванной концентрацией напряжений в образцах, во время испытаний на сжатие на их поверхность устанавливали защитные насадки (рисунок 2).



Рисунок 1. Электрическая печь для нагрева образцов



Рисунок 2. Образцы с защитными насадками перед испытанием на сжатие

Образцы после взрывного раскалывания показаны на рисунке 3. На рисунке 4 показана кривая процесса увеличения температуры, используемая электрической печкой, и для сравнения – кривая стандарта ISO 834, которая используется в большинстве пожарных испытаний.



Рисунок 3. Образцы после испытания на взрывное раскалывание

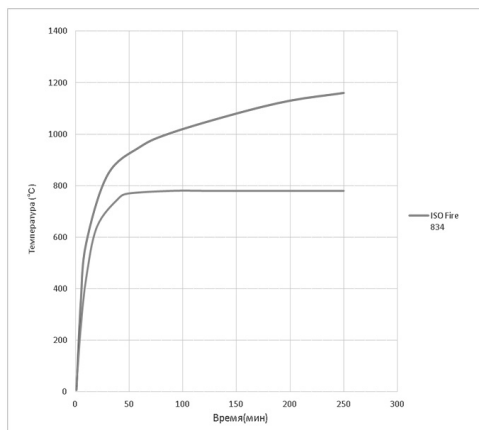


Рисунок 4. Графики изменения температуры в электрической печи и по стандарту ISO 834

Первый этап испытаний доказал, что микрокремнезем увеличивает потерю прочности бетона на сжатие при высоких температурах. Содержание ППВ уменьшает потерю сопротивления при сжатии. Результаты испытаний представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты испытаний

Состав	Уменьшение массы образцов, %	Уменьшение сопротивления на сжатие, %	Прочность в возрасте 28 суток, МПа
1	21,54	72,65	76,67
2	21,04	63,00	66,02
3	22,08	81,13	85,74
4	27,89	81,60	82,30
5	23,36	73,50	77,47
6	15,42	79,36	90,10
7	22,75	85,26	65,84
8	19,25	82,52	93,64
9	14,10	82,73	80,30
10	19,85	100	65,17
11	20,78	74,64	78,49
12	22,54	66,15	82,29
13	23,94	73,74	81,43
14	14,51	78,30	76,21
15	18,60	78,61	64,46
16	15,48	100	71,79

Сравнение значений сопротивления образцов на сжатие до и после испытания представлено на рисунке 5.

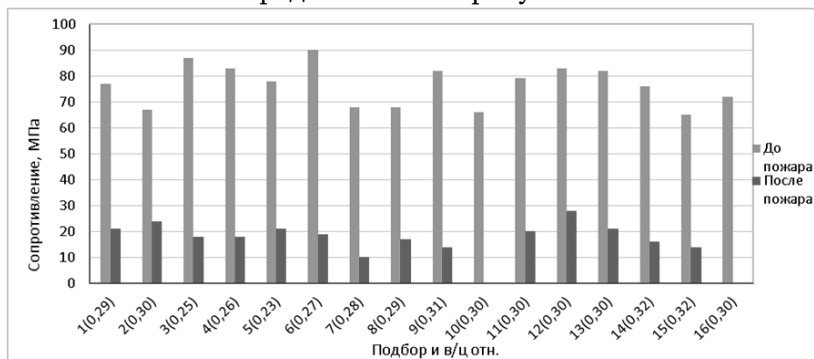


Рисунок 5. Сравнение прочности образцов на сжатие до и после нагрева

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА, АРМИРОВАННОГО ППВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 100, 200, 400, 600, 800 °С

На данном этапе использовали цилиндрические образцы размерами 10 20 см. Для предотвращения взрывного откалывания эти образцы армировали полипропиленовыми волокнами. Было приготовлено 5 подобранных составов с лучшими показателями по предыдущему испытанию. Образцы каждого состава испытывали при температуре 100, 200, 400, 600 и 800 °С.

Полипропиленовые волокна при температуре от 160 до 180 °С плавятся и создают поры и пустоты в бетоне, которые служат как каналы для выхода пара.

Второй этап испытаний показал, что содержание полипропиленовых волокон уменьшает потерю сопротивления. Интересным явлением стало отсутствие хрупкого разрушения. График изменения прочности бетона при его нагревании до температуры 800 °С представлен на рисунке 6.

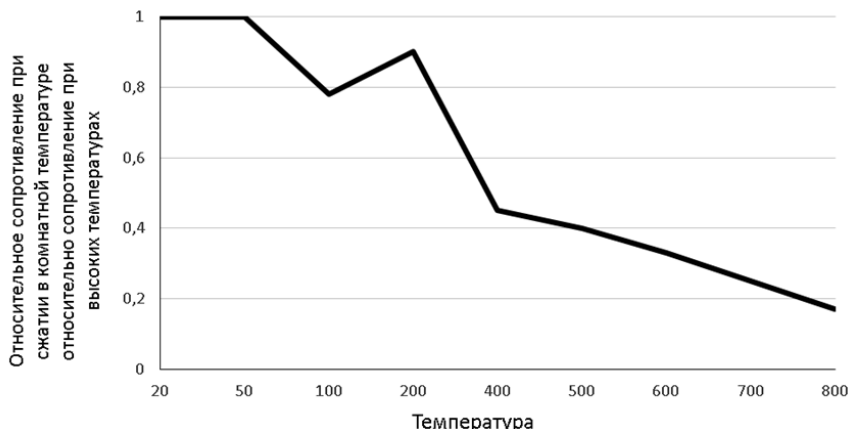


Рисунок 6. Усредненный график потери сопротивления высокопрочного бетона с волокнами при нагревании до температуры 800 °C

Как показано на данном графике, при всех температурах, кроме температуры 200 °C, наблюдается потеря прочности бетона, что обусловлено силами сцепления между частицами геля CSH (силикатная структура), которые появились за счет уменьшения воды в бетоне. При температуре 400 °C, сопротивление бетона падает на 50 % относительно сопротивления при комнатной температуре. При температуре 600 °C из-за повреждения силикатной структуры сопротивление падает до 30 %. Наконец, при температуре 800 °C сопротивление достигает 15 % от сопротивления при комнатной температуре.

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА ОТ КОЛИЧЕСТВА И РАЗМЕРОВ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ВОЛОКОН

Высокопрочный бетон имеет ряд недостатков, таких как хрупкость и низкое сопротивление огню. Использование полипропиленовых волокон, имеющих низкую стоимость, является эффективным решением для преодоления этих проблем. Использование полипропиленовых волокон в бетонной смеси препятствует хрупкому разрушению бетона. В исследовании

изучено влияние длины и количества ППВ на прочность бетона на сжатие. Образцы кубиков с длиной ребра 150 мм изготовили из составов, не содержащих ППВ и содержащих ППВ длиной 6, 12 и 18 мм в количестве 0,6/1,3/2,0 и 2,7 кг/м³. Осадка конуса составов без добавления ППВ и суперпластификатора составляла от 40 до 50 мм. Образцы хранили в течение 7 и 28 суток.

Результаты испытаний показали, что при увеличении количества ППВ в бетоне прочность на сжатие увеличивается.

У образцов с волокнами длиной 12 мм прочность на сжатие выше, чем у образцов с волокнами 6 мм и 18 мм. При длине 12 мм волокна удерживают структуру, а при длине 18 мм слишком длинные волокна создают пустоты и поры в бетоне, тем самым увеличивая трещинообразование. Прочность образцов, не содержащих ППВ и содержащих ППВ длиной 6, 12 и 18 мм в возрасте 7 и 28 суток представлена на рисунках 7, 8.

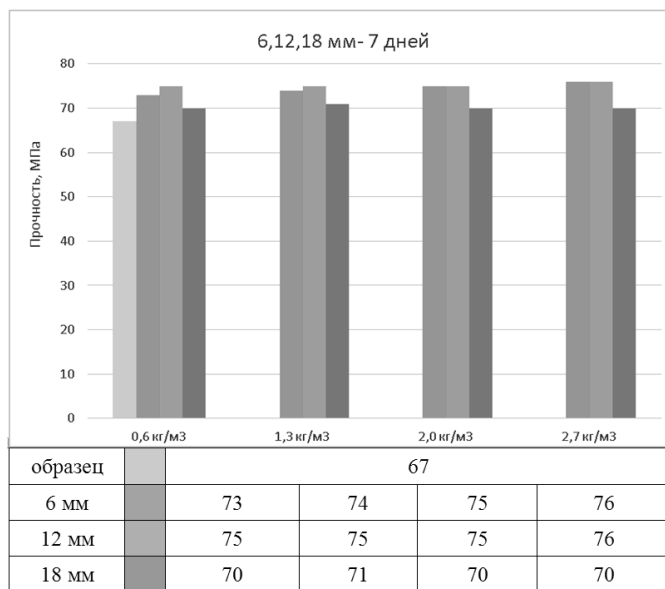


Рисунок 7. Соппротивление образцов в возрасте 7 суток

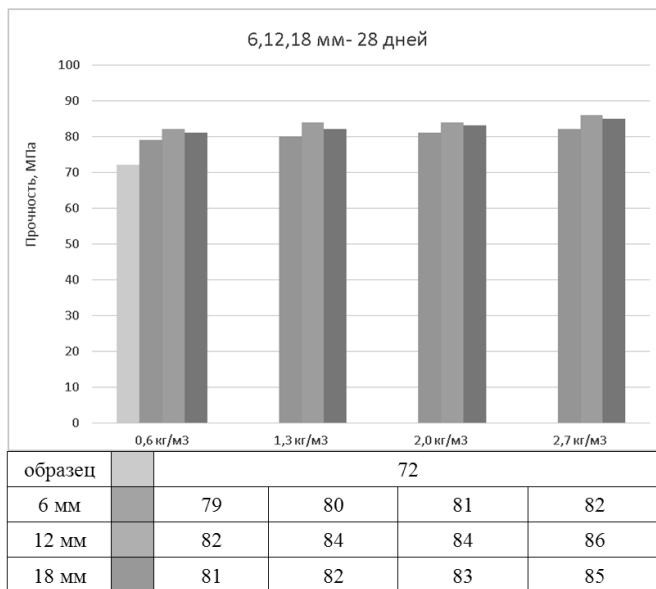


Рисунок 8. Сопротивление образцов в возрасте 28 суток

На рисунках 9, 10 видно, что образцы бетона без ППВ после нагружения полностью разрушились, тогда как образцы бетона с ППВ при аналогичной нагрузке сохранили свою геометрию. На рисунке 10 видно, что в бетоне с волокнами появились трещины вдоль направления приложения нагрузки.



Рисунок 9. Высокопрочный бетон без ППВ после нагружения



Рисунок 10. Высокопрочный бетон, содержащий ППВ, после нагружения

ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ФИБРОБЕТОНА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ ОТ ОБЪЕМА ФИБРЫ

Образцы кубиков с длинной ребра 150 мм изготовили из 4 составов с содержанием ППВ длиной 12 и объемом 0,6/1,3/2 и 2,7 кг/м³. Образцы в течение 8 часов находились в печи при температуре 450 °С.

Результаты показывают, что введение волокна в высокопрочный бетон увеличивает прочность на сжатие и термостойкость образцов. После того, как волокна расплавились, образуются капилляры, через которые может выйти пар из массива бетона. На рисунке 11 видны поры, возникшие в бетоне в процессе выгорания ППВ и выхода пара. Увеличение количества, вводимого ППВ и его выгорание, увеличивает объем пор и пустот, что приводит к снижению прочности бетона на 7,6 % (рисунок 12). Однако образование пор предотвращает взрывное откалывание бетона, что значительно повышает безопасность его использования в пожароопасных местах (например, в тоннелях).



Рисунок 11. Поры, образовавшиеся на поверхности бетона во время выхода пара

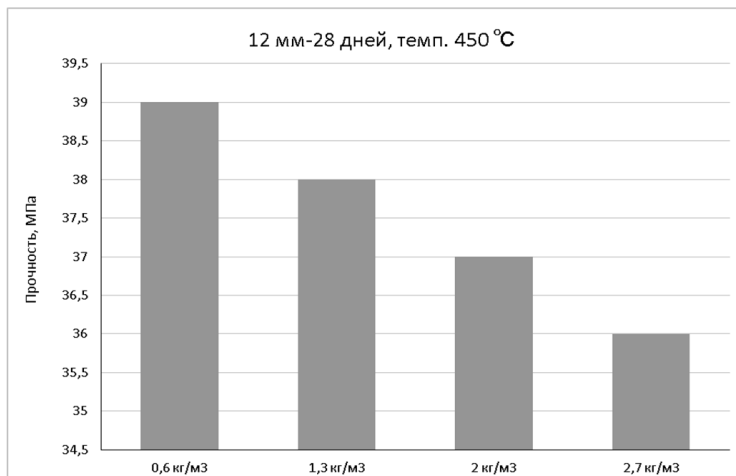


Рисунок 12. Прочность образцов бетона с волокнами длиной 12 мм на сжатие после нагревания до 450 °С

ВЫВОДЫ

Результаты проведенной работы показали, что полипропиленовые волокна эффективно предотвращают взрывное откалывание и снижают риск потери несущей способности бетона в результате взрывного откалывания. С учетом характеристик и экономичности ППВ, предлагается использовать волокна в конструкциях тоннелей и метрополитенов. Содержание ППВ в бетоне улучшает его механические характеристики. Добавление ППВ увеличивает сопротивление бетона на сжатие, при увеличении их содержания этот показатель возрастает.

Дисперсное армирование органическими волокнами улучшает физико-механических показатели бетонов, в частности, происходит трехмерное упрочнение композитов, цементный камень приобретает высокую трещиностойкость, повышается сопротивление ударным и динамическим нагрузкам.

Полипропиленовые волокна повышают долговечность бетона, снижают образование внутренних микротрещин и способствуют микроструктурному уплотнению.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hertz, K. A. Danish Investigations on Silica Fume Concretes at Elevated Temperatures / K. A. Hertz // ACI Spring Convention. Beton. – Copenhagen, 1991. – 200 pp.
2. Castillo, C. C. Effect of transient high temperature on high-strength concrete / C. C. Castillo, A. J. Durrani. // ACI Material Journal. – Rome, 1990. – pp. 47–53.
3. Felicetti, R. B. Residual Mechanical Properties of High-Strength Concrete Subjected to High-Temperature Cycles / R. B. Felicetti, P. G. Gambarova, G. P. Rosati // Proceedings of 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete. – Paris, 1996. – P.250.
4. Phan, L. T. Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures / L. T. Phan, N. J. Carino // ACI Materials Journal. – London, 2002. – pp. 54–66.
5. Han, C. G. Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement / C. G. Han, Y. S. Hwanga, S. H. Yangb // Cement and Concrete Research. – New York: 2004. – pp. 1747–1753.
6. Behnood, A. H. Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures / A. H. Behnood, H. C. Ziari // Cement & Concrete Composites. – Paris, 2008. – pp. 106–112.
7. Sahmaran, M. N. Assessing Mechanical Properties and Microstructure of Fire-Damaged Engineered Cementitious Composites / M. N. Sahmaran, M. R. Lachemi, V. C. Li // ACI Materials Journal. – Tehran, 2010. – pp. 297–304.
8. Строительное издание Франции [Электронный ресурс] / Строительство сегодня. – Леон, 2015. – Дата доступа: 10.03.2015.
9. Fibres for concrete. Steel fibres. Definitions, specifications and conformity: BS EN 14889-1:2006. – Publication Date

- 29.09.06. – The European Committee for Standardization: BSI, 2006 – 30 p.
10. Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete: ASTM C116 / C116-03. – Publication Date 10.05.08. – ASTM International: West Conshohocken, 2008 – 22 p.
 11. Корнеев, В. И. Сухие строительные смеси (состав, свойства, применение): учеб. пособие / В. И. Корнеев, П. В. Зозуля, И. Н. Медведева. – М.: СПбГТИ (ТУ), 2008. – 319 с.
 12. Рыбьев, И. А. Строительное материаловедение: учеб. пособие для строит. спец. вузов / И. А. Рыбьев. – М.: Высш. шк., 2002. – 701 с.
 13. Технология бетона: учебник / Ю. М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 500 с.
 14. Пухаренко, Ю. В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов / Ю. В. Пухаренко // Строительные материалы. – 2004. – № 10. – С. 47–50.

REFERENCES

1. Hertz K. A. (1991). Danish Investigations on Silica Fume Concretes at Elevated Temperatures. *ACI Spring Convention. Beton*. Copenhagen, 1991. 200 pp.
2. Castillo C. C., Durrani A. J. (1990) Effect of transient high temperature on high-strength concrete. *ACI Material Journal*. Rome, 1990. pp. 47–53.
3. Felicetti R. B., Gambarova P. G., Rosati G. P. (1996). Residual Mechanical Properties of High-Strength Concrete Subjected to High-Temperature Cycles. *Proceedings of 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete*. Paris, 1996. P.250.
4. Phan L. T., Carino N. J. (2002). Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures. *ACI Materials Journal*. 2002. Pp. 54–66.

5. Han C. G., Hwanga Y. S., Yangb S. H. (2004). Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement. *Cement and Concrete Research*. New York, 2004. pp. 1747–1753.
6. Behnood A. H., Ziari H. C. (2008). Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement & Concrete Composites*. Paris, 2008. pp. 106–112.
7. Sahmaran M. N., Lachemi M. R., Li V. C. (2010). Assessing Mechanical Properties and Microstructure of Fire-Damaged Engineered Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*. Tehran, 2010. pp. 297–304.
8. Construction edition of France [Electronic resource]. *Construction today*. Leon, 2015. Access date: 10.03.2015.
9. *Fibers for concrete. Steel fibers. Definitions, specifications and conformity*: BS EN 14889-1: 2006. Publication Date 09.29.06. The European Committee for Standardization: BSI, 2006 – 30 pp.
10. *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete*: ASTM C116 / C116-03. Publication Date 10.05.08. ASTM International: West Conshohocken, 2008. 22 pp.
11. Korneev V. I., Zozulya P. V., Medvedev I. N. *Sukhie stroitelnye smesi (sostav, svoystva, primeneniye): ucheb. posobie* [Dry building mixtures (composition, properties, application): tutorial]. Moscow: SPbGTI (TU), 2008. 319 p. (rus)
12. Rybiev I. A. *Stroitelnoe materialovedeniye: ucheb. posobie dlya stroit. spets. vuzov* [Building materials science: tutorial]. Moscow: Higher school, 2002. 701p. (rus)
13. *Bazhenov Yu. M. Tekhnologiya betona: uchebnik* [Concrete technology: tutorial]. Moscow: Publishing house ASV, 2003. 500 p. (rus)
14. Pukharenko Yu.V. *Building materials*. 2004. No.10. pp. 47–50. (rus)

Статья поступила: 05.11.2020

Received: 05.11.2020