

Ю.В. ПУХАРЕНКО¹, М.П. КОСТРИКИН¹¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ), г. Санкт-Петербург, Россия

СТОЙКОСТЬ ФИБРОБЕТОНА К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования изменений структуры и свойств бетона, армированного низко модульными синтетическими микро волокнами, после воздействия на него высоких температур. Осуществлен анализ причин возникновения в бетоне феномена взрывного разрушения при нагревании. Выполнен обзор современных методов повышения огнестойкости строительных конструкций, включая возможные способы предотвращения их взрывного разрушения при возникновении пожара. Показано, что синтетическая микрофибра выгорает при температуре, близкой к 400°C, образуя дополнительную пористость для выхода воды в виде пара из бетона. При дальнейшем повышении температуры до 600°C образуется значительное число трещин, повышающих дефектность структуры и снижающих прочность фибробетона. Проведено сравнение водонепроницаемости бетонных и фибробетонных образцов после температурного воздействия по коэффициенту фильтрации. Уточнен механизм повышения стойкости бетонов к воздействию высоких температур и взрывному разрушению при нагревании в результате армирования низко модульными микро волокнами.

Ключевые слова: фибробетон, синтетическое микро волокно, огнестойкость, высокие температуры, взрывное разрушение, структура, прочность, водонепроницаемость.

Yu.V. PUKHARENKO¹, M.P. KOSTRIKIN¹¹Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Saint-Petersburg, Russia

RESISTANCE OF FIBER-REINFORCED CONCRETE TO HIGH-TEMPERATURES

Abstract. The article presents the results of a study of changes in the structure and properties of concrete reinforced with low-modulus synthetic microfibres after exposure to high temperatures. The analysis of the causes of the phenomenon of explosive destruction in concrete during heating is carried out. A review of modern methods of increasing the fire resistance of building structures, including possible ways to prevent their explosive destruction in the event of a fire, is performed. It is shown that synthetic microfiber burns out at a temperature close to 400 °C, forming additional porosity for water to escape in the form of steam from concrete. With a further increase in temperature to 600 °C, a significant number of cracks are formed that increases the defectiveness of the structure and reduces the strength of fiber concrete. Comparison of the water resistance of concrete and fiber-reinforced concrete samples after temperature exposure by the filtration coefficient is carried out. The mechanism of increasing the resistance of concrete to high temperatures and explosive destruction upon heating as a result of reinforcing with low-modulus microfibers has been clarified.

Keywords: Fiber-reinforced concrete, synthetic microfiber, fire resistance, high temperatures, explosive destruction, structure, strength, water impermeability.

1 Введение

Бетон и железобетон остаются основными конструкционными материалами в строительстве на протяжении длительного времени. При этом, наука о бетоне не стоит на месте, и достижения последних десятилетий, такие как высокопрочные высококачественные бетоны, в том числе дисперсно армированные и наномодифицированные, успешно применяются при возведении зданий и сооружений. Сочетание различных инновационных

решений позволяет получать композиты с уникальными свойствами, ранее недостижимыми. Следует отметить, что при проектировании различных строительных объектов определяющим качеством для выбора конструкционных материалов практически всегда являются его прочностные характеристики, которые задаются классами по прочности на сжатие и растяжение при изгибе. Для отдельных видов конструкций помимо прочности к бетону предъявляются требования по показателям долговечности, таким как водонепроницаемость, морозостойкость или истираемость. При современном уровне развития бетоноведения даже значительное улучшение требуемых характеристик прочности и долговечности уже не кажется невыполнимой задачей. Вместе с тем уместно заметить, что ежегодно в мире происходит огромное количество пожаров, в том числе на объектах, относящихся к уникальным зданиям и сооружениям: тоннели под горой Монблан (1999) и под проливом Ла-Манш (2008), мосты на о. Русский (2012) и на центральном участке Западного скоростного диаметра в Санкт-Петербурге (2016)], Останкинская телебашня (2000), небоскрёбы ВТЦ в Нью-Йорке (2001), Grenfell Tower в Лондоне (2017)] и другие. При пожаре высокая огнестойкость строительных конструкций является залогом не только структурной целостности здания, но и безопасности людей, находящихся внутри помещений. На этом фоне малоизученным остаётся вопрос о процессах, происходящих в структуре бетона при его нагревании до высоких температур, и о том, какое влияние оказывают на неё всевозможные органические или минеральные добавки, а также армирование волокнами различной природы. Учитывая это, актуальность темы данного исследования не вызывает сомнений.

Работа выполнена в соответствии с Планом фундаментальных исследований Минстроя России и РААСН на 2020 год.

2 Современное состояние вопроса

Вопросами огнестойкости строительных конструкций в разное время занимались М.Я. Ройтман, Н.А. Стрельчук, В.П. Бушев, В.А. Пчелинцев, В.М. Ройтман и др. Для конструкций, изготовленных из различных материалов, установлены возможные условия развития пожара, произведена классификация зданий и сооружений по пожарной опасности, определены критерии нормирования и разработаны методики расчёта огнестойкости конструкций в зависимости от их вида.

Наиболее частым способом повышения огнестойкости строительных конструкций является устройство барьерной изоляции из негорючих материалов, например, керамических, минераловатных или хризотилцементных экранов, а также нанесение вспучивающихся покрытий на основе вермикулита или перлита, создающих на обогреваемой поверхности воздушный зазор [1, 5, 6]. Однако подобные варианты изоляции не всегда возможны, и в этих случаях уместна модификация основного конструкционного материала – бетона с целью повышения его собственной огнестойкости.

В.П. Бушевым отмечаются особенности поведения бетона в условиях пожара, в том числе склонность к взрывному разрушению. "Во время пожаров или при испытаниях на огнестойкость через 10–15 мин после начала воздействия огня на конструкцию бетон может взрывообразно разрушаться, откалываясь от обогреваемой поверхности пластинами... <...> Куски отслаивающегося бетона отлетают при этом с хлопками на расстояние до 10–15 м. Такое разрушение происходит непрерывно на всей поверхности, которая подвергается воздействию огня, и приводит к быстрому уменьшению сечения конструктивного элемента" [1]. Причиной такого разрушения является переход воды, содержащейся в порах и капиллярах, в газообразное состояние с увеличением в объёме до 1700 раз [2] и, соответственно, с резким повышением давления водяного пара до 7...12 атм, вызывающего в бетоне растягивающие напряжения, значительно превышающие предел его прочности [3]. Отмечается, что склонность к взрывному разрушению практически не зависит от класса бетона по прочности или вида заполнителей и в большей степени определяется его средней плотностью и влажностью: "При влажности бетона выше 5% он разрушался почти во всех

случаях, при влажности 3,5–5% разрушение не было характерным или оно было местным (поверхностным), и лишь при влажности менее 3% взрывы не наблюдались" [1]. Такой вид разрушения является характерным для конструкций, возраст которых составляет 1 – 2 года, поскольку часто примерно к этому сроку эксплуатации в естественно-воздушных условиях влажность бетона приближается к равновесной в пределах 2% [4]. Однако, встречаются ситуации, требующие особого внимания. Например, подземные сооружения Санкт-Петербурга, построенные на обводнённых грунтах, имеют влажность, которая зачастую превышает относительно безопасные с точки зрения взрывного разрушения 3%.

Одним из способов противодействия взрывному разрушению бетона вследствие резкого испарения из него воды и повышения огнестойкости в целом отечественные и зарубежные учёные считают применение фибрового армирования.

В рамках исследований фибробетонов, в том числе проводимых в СПбГАСУ на протяжении многих лет, накоплен значительный массив данных о влиянии различных видов дисперсной арматуры на многие важнейшие характеристики бетонов [13, 15–20]. В частности, установлено, что армирование бетона стальными волокнами способствует повышению прочности, трещиностойкости и вязкости разрушения [15, 16]. Значительного увеличения прочности на изгиб, модуля упругости и ударостойкости удалось достичь применением аморфнометаллической фибры. [17] Низкомодульные синтетические макроволокна также способствуют некоторому повышению прочности на изгиб и вязкости разрушения, одновременно оказывая положительное влияние на структурные характеристики композита [15, 17, 18]. Микроволокна, являясь элементами микроструктуры, приводят к образованию огромного количества контактных зон на границах раздела между волокном и матрицей, представленных цементным камнем повышенной плотности и прочности, что в конечном итоге благоприятно сказывается на долговечности композитов [18]. В данной работе представлены результаты испытаний температуростойкости образцов фибробетона, армированного низкомодульными синтетическими микроволокнами. Согласно существующему мнению, синтетическая микрофибра, выгорая при сравнительно низких температурах, образует систему открытых пор и капилляров, через которые вода свободно выходит в виде пара, не создавая давления, приводящего к взрывному разрушению [4, 7–12].

3 Используемые материалы и методы исследования

Исследование проводилось на образцах из мелкозернистого наномодифицированного бетона, состав которого оставался неизменным, что позволило произвести сравнительный анализ различных вариантов армирования без учёта влияния матрицы. Расход компонентов на 1 м³ мелкозернистой бетонной смеси был принят следующим: портландцемент (Цем I 42,5 Н производства ОАО «Цесла») – 663 кг/м³; мелкий заполнитель (песок, М_к = 2,28) – 1326 кг/м³; добавка (наномодифицированный суперпластификатор Макромер П-163) – 2,65 кг/м³ (0,4% от массы цемента); вода – 235 л. Армирование производилось низкомодульными синтетическими микроволокнами Fibrin XT, длиной 13 мм и диаметром 0,022 мм (рисунок 1). Для приготовления бетонных смесей использовался лабораторный двухвальный смеситель принудительного перемешивания ЛС-ЦБ-10.



Рисунок 1 – Синтетическое микроволокно Fibrin XT

Из смеси каждого состава изготавливались образцы – призмы размером 7x7x28 см, кубы с ребром 10 см и плитки размером 15x15x7 см. Образцы твердели в течение 28 суток в лабораторном шкафу, автоматически поддерживающем влажность 95±5% и температуру 20±2 °С. После набора прочности образцы извлекались из шкафа и хранились в естественно-воздушных условиях для достижения ими равновесной влажности в течение 7 суток. На образцах-призмах перед испытанием были выполнены начальные надрезы глубиной 25 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 29167 "Бетоны. Методы определения

характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении". В процессе испытаний образцы подвергались высокотемпературному воздействию в лабораторной муфельной печи по следующему режиму:

- подъем температуры до заданных значений, составляющих 200°C и 400°C, осуществлялся с максимально возможной для печи скоростью. При условии нагрева образцов до 600°C применялся ступенчатый подъем температуры с промежуточной выдержкой при 350°C с целью снижения внутренних напряжений и предотвращения быстрого испарения свободной и большей части физически связанной воды;
- изотермическая выдержка бетонных и фибробетонных образцов при максимальных температурах составляла 4 часа;
- охлаждение образцов до температуры 200–250 °C происходило в печи после ее отключения, и далее на металлическом поддоне в естественно-воздушных условиях до комнатной температуры.

Определение прочности образцов осуществлялось по ГОСТ 10180 "Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам", характеристики трещиностойкости и вязкости разрушения определялись в соответствии с методикой ГОСТ 29167 "Бетоны. Методы определения характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении" с использованием специально сконструированной установки [19, 20].

Для косвенной оценки стойкости против взрывного разрушения и степени повышения огнестойкости материала в целом использовались результаты сравнительных испытаний проницаемости бетонных и фибробетонных образцов, прошедших высокотемпературную обработку. Предполагалось, что изменение проницаемости в данном случае может служить характеристикой структуры фибробетонов после выгорания волокон и образования системы сообщающихся пор, через которые при пожаре будет выходить вода в виде пара. Проницаемость образцов оценивалась величиной коэффициента фильтрации, показывающего количество воды, прошедшей через образец за определённое время при фиксированном давлении. Испытания образцов-плиток на водопроницаемость, после предварительной герметизации боковых граней двухкомпонентной эпоксидной краской, проводились с использованием лабораторной установки Matest C430.

4 Результаты испытаний

В экспериментальной части исследования изготовлены и испытаны несколько серий образцов фибробетона, армированных синтетическими микроволокнами в количестве 0,1%, 0,3%, 0,5%, 0,7% и 0,9% по объему. Прежде чем приступить к анализу полученных результатов, целесообразно привести данные из технической литературы о процессах, последовательно протекающих в бетоне при нагревании [3, 13, 14].

Вода в бетоне находится в трёх состояниях: свободном, физически и химически связанном. При температуре около 60°C сила взаимодействия между молекулами свободной воды в порах и капиллярах цементного камня и заполнителей становится настолько малой, что не препятствует её переходу в газообразное состояние. Дальнейшее нагревание до температуры кипения приводит к постепенному удалению свободной воды из приповерхностного слоя, одновременно отмечается некоторое снижение прочности материала. Дальнейшее нагревание до 150 – 200°C сопровождается расширением цементного камня и уплотнением структуры, что приводит к некоторому увеличению прочности бетона на сжатие и изгиб относительно первоначального состояния [14]. При нагревании бетона до температуры 200-250°C может наблюдаться более значительное увеличение прочности бетона, что связано с так называемым явлением "самозапаривания", при котором при повышенной влажности и давлении внутри материала происходят реакции, характерные для автоклавной обработки: кремнезём заполнителя взаимодействует с гидратом окиси кальция с образованием тобермаритоподобных соединений. Дальнейшее нагревание до температур 300°C и выше сопровождается появлением дефектов на границах раздела между цементным

камнем и заполнителем, что обусловлено испарением физически связанной воды из пор геля, размер которых составляет 10 - 20 Å, и из которых очень трудно удалить воду при меньших температурах. Прочность бетона начинает снижаться. Третья категория воды – химически связанная с клинкерными минералами – начинает испаряться при температурах 500°C и выше в результате реакции дегидратации. При этом прочность бетона уменьшается в среднем на 20%. Дальнейшее нагревание до 600 – 800°C приводит к декарбонизации соединений кальция и значительному снижению прочности материала. При температуре выше 800°C происходит практически полное разрушение структуры (до уровня 15 – 20% от первоначальной величины) вследствие разложения минералов, слагающих зёрна заполнителей [3].

Исследователи огнестойкости бетона отмечают, что «взрыв бетона происходил при влажности более 5% и температуре 160-260°C, что соответствует максимальному давлению пара внутри бетона 7–20 атм» [1]. Согласно данным производителей синтетических волокон, температура плавления полипропиленовой фибры составляет 165°C. Таким образом, идея применения выгорающей дисперсной арматуры представляется весьма плодотворной. Именно в указанном интервале температур должна возникать система сообщающихся пор и капилляров, благодаря которой расширяющаяся вода испаряется из бетона, не встречая сопротивления. Однако в результате настоящих исследований установлено, что при 200°C волокна не выгорают даже после выдержки образцов в течение 4 часов (рисунок 2 а). В связи с этим проведено дополнительное исследование, в ходе которого образцы синтетических волокон нагревались в муфельной печи в керамических чашах в интервале температур от 150 °C до 400°C с выдержкой на отдельных ступенях через каждые 50°C в течение 10 минут. Установлено, что при 200°C началось оплавление концов волокон, при 250°C волокна стали спекаться, а при 300°C склеились между собой, при 350°C волокна полностью расплавились и перешли в жидкое состояние, после чего началось обугливание с интенсивным выделением дымовых газов. Дальнейший нагрев привёл к воспламенению полимера. Таким образом, можно заключить, что свободный выход пара из бетона, благодаря выгоранию волокон, может начинаться при температуре, превышающей 350°C.

Осмотр бетонных и фиброармированных образцов после извлечения из печи и охлаждения показал, что на всех их гранях образовались нитевидные трещины, количество и размер которых увеличивался с повышением температуры обработки. При содержании микрофибры до 0,5% по объёму размер трещин оказался меньшим, чем у контрольного образца, внутри образцов остались капиллярные поры на месте выгоревших волокон (рисунок 2 б). Дальнейшее насыщение матрицы волокнами привело к определенной неравномерности распределения их по объёму вплоть до появления комков, на месте которых после выгорания при высокой температуре образовались пустоты, увеличивающие проницаемость образцов и снижающие их прочность в процессе испытаний.

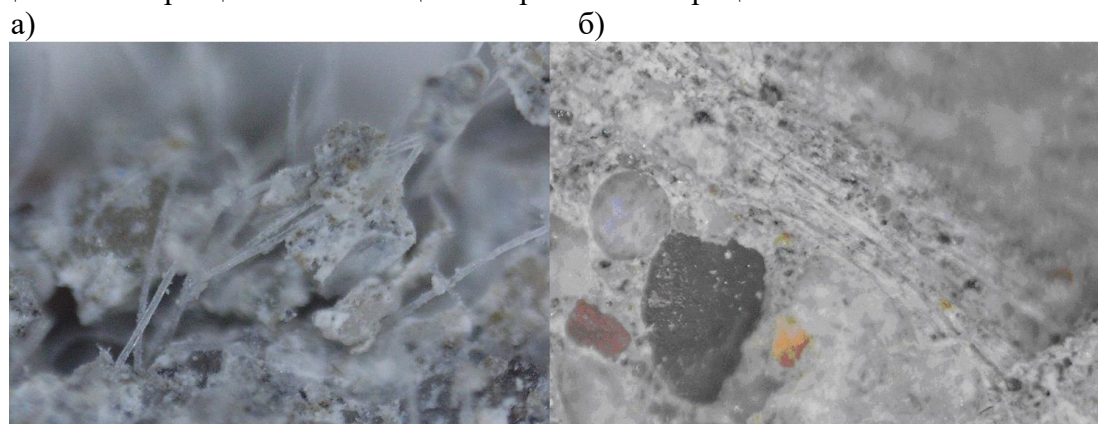


Рисунок 2 – Микрофотографии структуры фибробетона: а) после нагрева и выдержки при 200°C, б) после нагрева и выдержки при 400°C

Анализ данных, представленных на рисунках 3 и 4, подтверждает информацию [3] о том, что после нагрева образцов до 200°C имеет место некоторое повышение их прочности на сжатие, что объясняется конструктивным влиянием армирующих волокон, которое проявляется в сдерживании процесса образования и развития трещин в бетонной матрице. Дальнейшее повышение температуры в печи приводит к понижению прочности композита, и после обработке при 600°C её значение при испытании образцов на сжатие составляет половину от первоначальной при том же проценте армирования, а прочность на изгиб снижается в 7-10 раз.

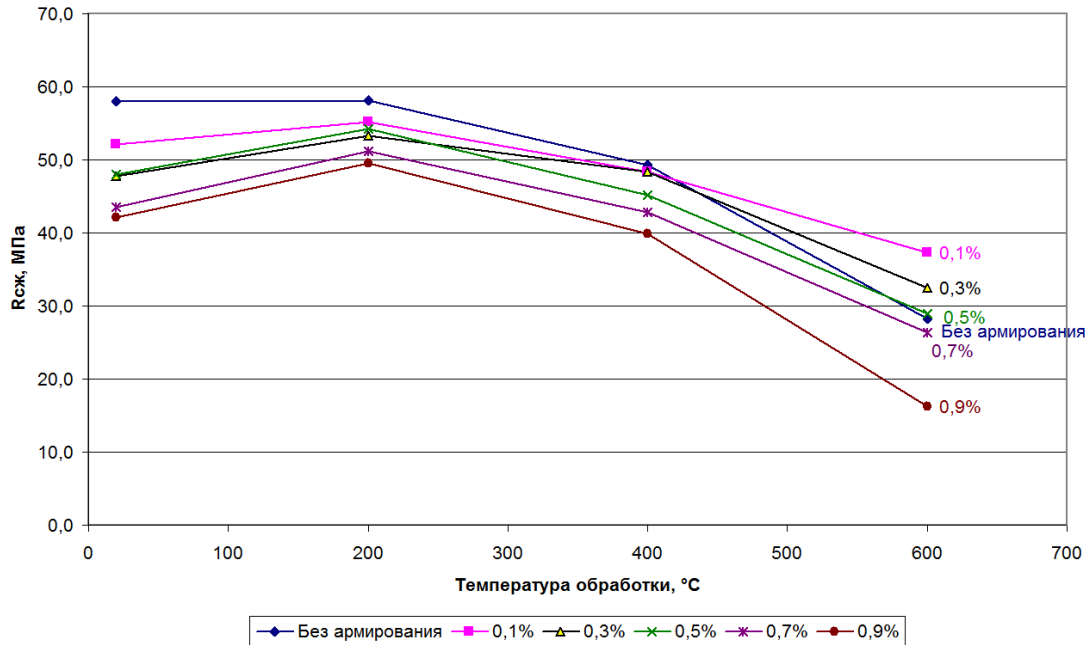


Рисунок 3 – Зависимость прочности на сжатие от процента армирования и температуры обработки

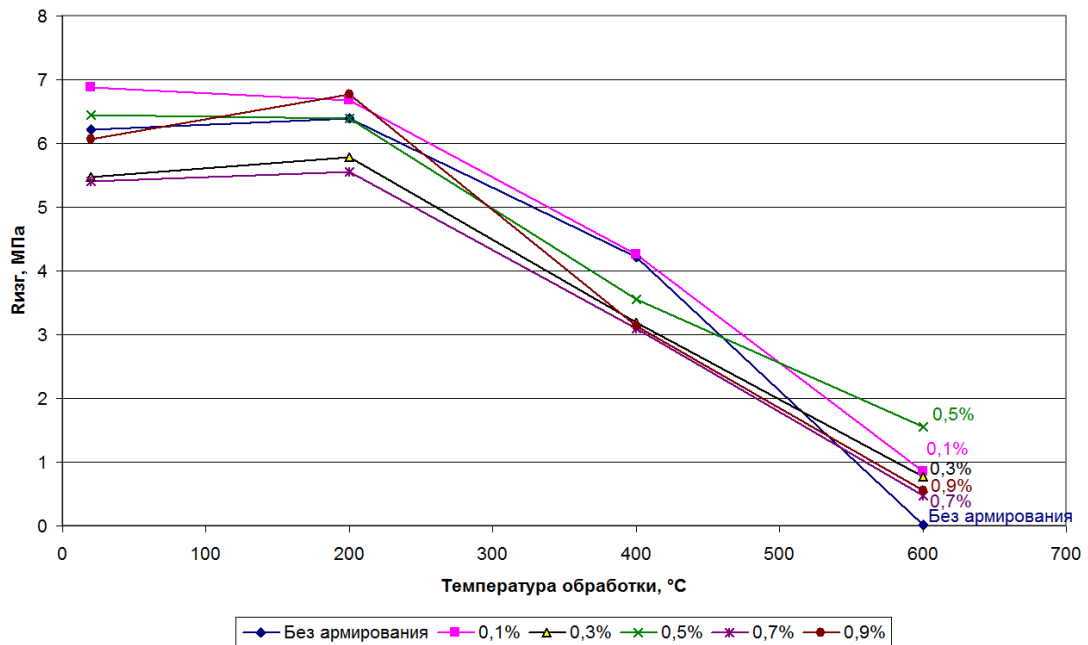


Рисунок 4 – Зависимость прочности на изгиб от процента армирования и температуры обработки

В таблице 1 и на рисунках 5 и 6 представлены результаты испытания водопроницаемости бетонных и фибробетонных образцов по коэффициенту фильтрации.

Таблица 1 – Результаты определения коэффициента фильтрации

Объемный процент армирования	Коэффициент фильтрации K_f , см/с			
	20°C	200°C	400°C	600°C
Без армирования	$1,80 \cdot 10^{-13}$	$1,46 \cdot 10^{-9}$	$5,49 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$
0,1%	$1,96 \cdot 10^{-14}$	$5,84 \cdot 10^{-9}$	$5,19 \cdot 10^{-7}$	$1,83 \cdot 10^{-6}$
0,3%	$1,50 \cdot 10^{-12}$	$1,35 \cdot 10^{-8}$	$2,46 \cdot 10^{-6}$	$5,70 \cdot 10^{-6}$
0,5%	$1,80 \cdot 10^{-12}$	$5,87 \cdot 10^{-8}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$8,32 \cdot 10^{-6}$
0,7%	$3,65 \cdot 10^{-12}$	$1,41 \cdot 10^{-7}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$
0,9%	$1,36 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$	$2,81 \cdot 10^{-6}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$

Анализ полученных данных показывает, что изначально (до температурного воздействия) мелкозернистая наномодифицированная бетонная матрица демонстрирует высокую водонепроницаемость ($K_f=1,8 \cdot 10^{-13}$ см/с, что соответствует марке по водонепроницаемости W20). При добавлении 0,1% фибры в результате модификации структуры исходного бетона, его уплотнения и упрочнения имеет место дальнейшее уменьшение проницаемости образцов ($K_f=1,96 \cdot 10^{-14}$ см/с). При дальнейшем насыщении матрицы волокнами проницаемость бетона повышается, и при максимальном проценте армирования (0,9% по объёму) коэффициент фильтрации достигает значений $1,36 \cdot 10^{-7}$ см/с (марка менее W2), что свидетельствует о неоднородности структуры бетона вследствие его «переармирования».

Анализ значений коэффициентов фильтрации образцов, полученных после нагревания до 200°C, показывает, что, несмотря на уменьшение их водонепроницаемости в целом, составы с 0,1% и 0,3% волокон сохраняют способность сопротивляться проникновению воды, практически, наравне с неармированным бетоном (рисунок 5), и в этом случае следует ожидать значительного сопротивления выходу воды из толщи конструкции при пожаре. Однако, ни один из образцов, армированный синтетической микрофиброй, не показал признаков взрывного разрушения в процессе термической обработки, что свидетельствует о положительной роли дисперсного армирования для снижения вероятности взрывного разрушения композита. Упрочняющее действие волокон при нагревании в указанном интервале температур усиливается по мере накопления в бетонной матрице микротрещин и других дефектов, в результате чего ее модуль деформации значительно понижается и в какой-то момент может оказаться даже ниже модуля упругости синтетической фибры.

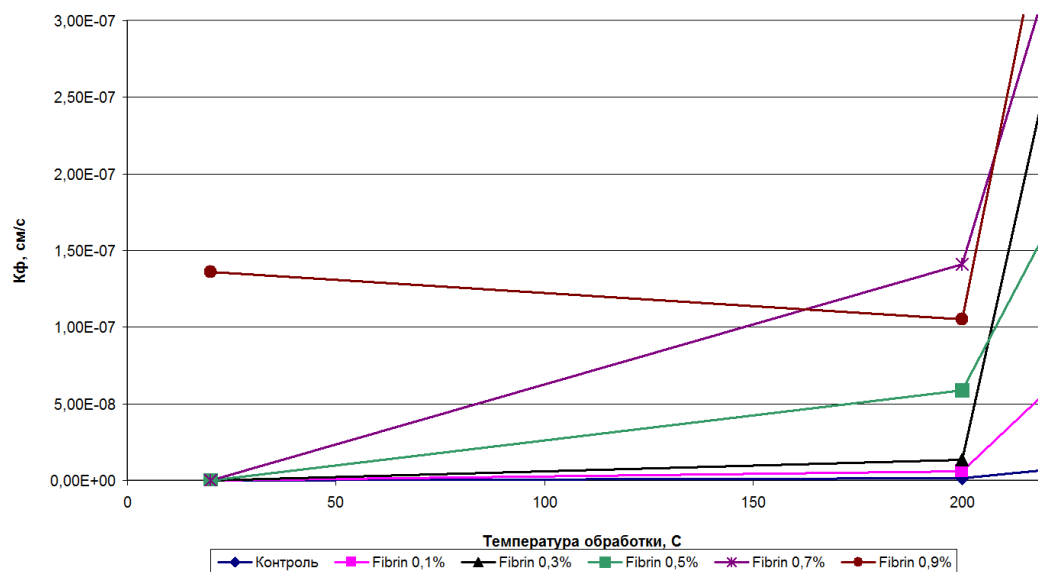


Рисунок 5 – Изменение коэффициента фильтрации в зависимости расхода фибры при температурах нагрева в интервале 20 - 200°C

По рисунку 6 видно, что после выдержки при температуре 400°C имеет место дальнейшее повышение проницаемости всех без исключения образцов, которое можно объяснить следующим образом.

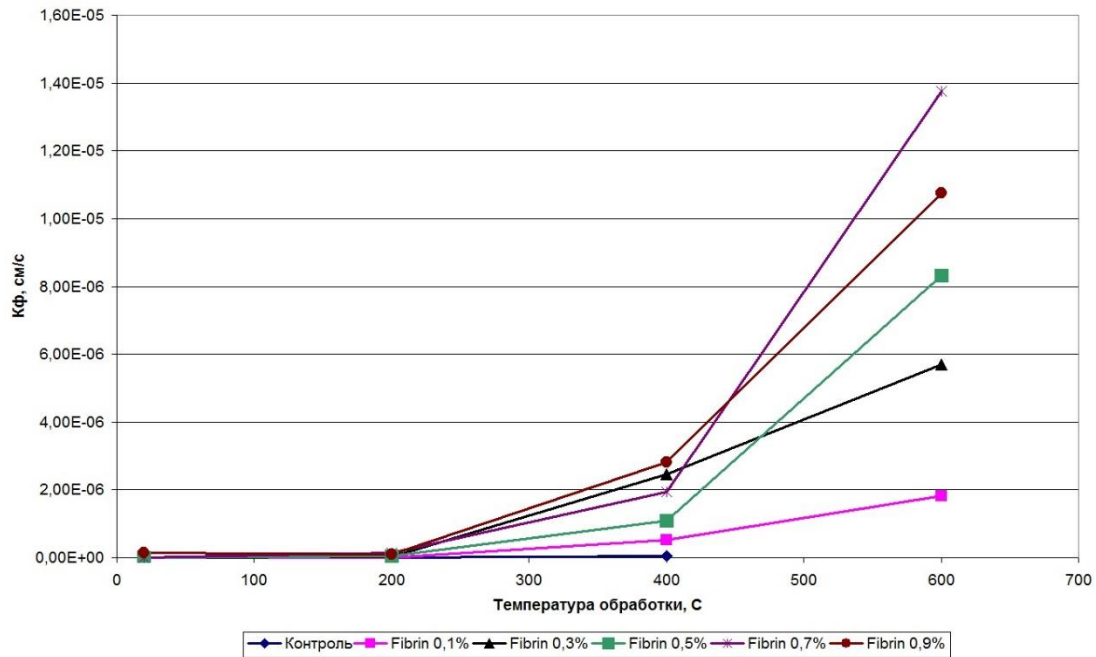


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента фильтрации от процента армирования и температуры обработки

При указанной температуре происходит полное выгорание полимерных волокон, они уже не состояниии сдерживать процесс трещинообразования в бетоне, и вода получает возможность свободного выхода из него в виде пара. При этом в фибробетонах испарение воды усиливается благодаря появлению сетки сквозных пор, капилляров и других дефектов, образованных на месте выгоревших волокон и пронизывающих образец по всему объёму. Таким образом, при дисперсном армировании значительно снижается риск взрывного разрушения конструкций при пожаре.

Согласно полученным данным, выдержка образцов при 600°C приводит к практически полному разупрочнению композита вне зависимости от вида и расхода волокон. График на рис. 6 наглядно иллюстрирует, что образцы не способны сопротивляться фильтрации воды даже при минимальном давлении (2-3 bar) как через сетку пор, оставшихся на месте выгоревших волокон, так и через огромное количество образовавшихся сквозных трещин. В качестве положительного момента, связанного с дисперсным армированием, следует отметить некоторую «наследственность» влияния волокон, которая, при определенном насыщении, выражается в большей сохранности структуры бетонной матрицы, остаточной прочности, что, в свою очередь, способствует сохранению целостности строительных конструкций и повышению их безопасности при пожаре.

5 Заключение

Армирование синтетическими микроволокнами позволяет повысить стойкость бетонов к действию высоких температур и снижает риск взрывного разрушения конструкций, что повышает их эксплуатационную надежность и безопасность при ликвидации пожара. Вместе с тем, установлено, что при выгорании при температурах выше 350°C такие волокна образуют токсичные дымовые газы, и это следует учитывать, особенно, при строительстве тоннелей и других подземных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушев В.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И. Огнестойкость зданий. М.: Стройиздат, 1970.
2. Вукалович, М.П. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Машиностроение, 1967. 160 с.
3. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Трещиностойкость высокопрочного бетона после воздействия высоких температур // Сборник научных трудов РААСН. Т.2. 2018. № 2 (5). С. 301-310.
4. Кузнецова И.С., Рябченкова В.Г., Корнюшина М.П., Саврасов И.П., Востров М.С. Полипропиленовая фибра – эффективный способ борьбы со взрывообразным разрушением бетона при пожаре // Строительные материалы. 2018. № 11. С. 15–20.
5. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М., Ассоциация «Пожнаука», 2001.
6. Ройтман В. М., Габдулин Р. Ш. Обеспечение стойкости железобетонных конструкций против взрывообразного разрушения при пожаре с помощью тонкослойных огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2013. № 2. С. 11–16.
7. Novak J., Kohoutkova A. Fibre reinforced concrete exposed to elevated temperature // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 246
8. Mitchell M. Using fibres in concrete for fire resistance // Concrete Engineering. 2007. Vol. 1. Pp. 6-8
9. Park J-J, Yoo D-Y, Kim S. Kim S-W. Benefits of synthetic fibers on the residual mechanical performance of UHPFRC after exposure to ISO standard fire // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 104.
10. Serrano R., Cobo A., Prieto M.I., Gonzales M. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 122, Pp. 302-309.
11. Shihada S. Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance // Journal of Civil Engineering and Management. 2011. Vol. 17 (2), Pp. 259-264.
12. Голованов В.И., Новиков Н.С., Павлов В.В., Антонов С.П. Прочностные характеристики фибробетона для тоннельных сооружений в условиях высоких температур // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 2. С. 63–67.
13. Кострикин М.П. К вопросу о влиянии высоких температур на прочностные характеристики фибробетона // Архитектура – Строительство – Транспорт: 74-ая научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПб., Ч. 1. 2018. С. 128-132.
14. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуре // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 12-17.
15. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2017. №1 (60). С. 172-176.
16. Пантелеев Д.А. Деформативные и прочностные характеристики полиармированного фибробетона // Известия КГАСУ. 2015. № 3 (33). С. 133-139
17. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Морозов В.И., Магдеев У.Х. Прочность и деформативность полиармированного фибробетона с применением аморфной металлической фибры // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 1. С. 107-111
18. Кострикин М. П. Влияние дисперсного армирования на долговечность цементных бетонов для дорожного строительства // Актуальные проблемы строительства: 70-я Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. СПб., 2017. С. 102 – 106.
19. Жаворонков М.И. Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. №3. С. 114-120.
20. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Методы определения характеристик трещиностойкости фибробетона // Сборник научных трудов РААСН. Том 2. 2019. С. 448-457.

REFERENCES

1. Bushev V.P., Pchelincev V.A., Fedorenko V.S., Yakovlev A.I. Ognestojkost' zdanij [Fire resistance of buildings]. Moscow: Strojizdat, 1970. (rus)
2. Vukalovich, M.P. Teplofizicheskie svojstva vody i vodyanogo para [Thermophysical properties of water and water vapor]. Moscow: Mashinostroenie, 1967. 160 p. (rus)
3. Leonovich S.N., Litvinovskij D.A. Treshchinostojkost' vysokoprochnogo betona posle vozdejstviya vysokih temperatur [Fracture resistance of high-strength concrete after exposure to high temperatures]. *Sbornik nauchnyh trudov RAASN*. T.2. 2018. No 2 (5). Pp. 301-310. (rus)
4. Kuznecova I.S., Ryabchenkova V.G., Kornjushina M.P., Savrasov I.P., Vostrov M.S. Polipropilenovaya fibra – effektivnyj sposob bor'by so vzryvoobraznym razrusheniem betona pri pozhare [Polypropylene fiber - an

- effective way to deal with explosive destruction of concrete in a fire]. *Stroitel'nye materialy*. 2018. No 11. Pp. 15–20. (rus)
5. Rojzman V.M. Inzhenernye resheniya po ocenke ognestojkosti proektiruemyh i rekonstruirovannyh zdaniy [Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings]. Moscow: Associaciya "Pozhnauka", 2001. (rus)
 6. Rojzman V.M., Gabdulin R. SH. Obespechenie stojkosti zhelezobetonnyh konstrukcij protiv vzryvoobraznogo razrusheniya pri pozhare s pomoshch'yu tonkoslojnyh ogneshchitnyh vspuchivayushchih pokrytij [Ensuring the resistance of reinforced concrete structures against explosive destruction in case of fire using thin-layer fire-retardant intumescent coatings]. *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya*. 2013. No 2. Pp. 11–16. (rus)
 7. Novak J., Kohoutkova A. Fibre reinforced concrete exposed to elevated temperature. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 246
 8. Mitchell M. Using fibres in concrete for fire resistance. *Concrete Engineering*. 2007. Vol. 1. Pp. 6-8
 9. Park J-J, Yoo D-Y, Kim S. Kim S-W. Benefits of synthetic fibers on the residual mechanical performance of UHPFRC after exposure to ISO standard fire. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 104.
 10. Serrano R., Cobo A., Prieto M.I., Gonzales M. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 122. Pp. 302-309.
 11. Shihada S. Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2011. Vol. 17 (2). Pp. 259-264.
 12. Golovanov V.I., Novikov N.S., Pavlov V.V., Antonov S.P. Prochnostnye karakteristiki fibrobetona dlya tonnel'nyh sooruzhenij v usloviyah vysokih temperatur [Strength characteristics of fiber-reinforced concrete for tunnel structures under high temperature conditions]. *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya*. 2017. No 2. Pp. 63–67. (rus)
 13. Kostrikin M.P. K voprosu o vliyanii vysokih temperatur na prochnostnye karakteristiki fibrobetona / M.P. Kostrikin [To the question of the influence of high temperatures on the strength characteristics of fiber-reinforced concrete]. *Arhitektura – Stroitel'stvo – Transport: 74-aya nauchnaya konferenciya professorsko-prepodavatel'skogo sostava i aspirantov universiteta [Architecture - Construction - Transport: 74th Scientific Conference of the Faculty and Graduate Students of the University]*. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. SPb., Part 1. 2018. Pp. 128-132. (rus)
 14. Leonovich S.N., Litvinovskij D.A. Vyazkost' razrusheniya vysokoprochnogo betona posle vozdejstviya vysokoj temperature [The fracture toughness of high-strength concrete after exposure to high temperature]. *Stroitel'nye materialy*. 2017. No 11. Pp. 12-17. (rus)
 15. Pukharenko Yu.V., Pantelev D.A., Zhavoronkov M.I. Opredelenie vklada fibry v formirovanie prochnosti stalefibrobetona [Determining the contribution of fiber to the formation of strength of steel fiber concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. No 1 (60). Pp. 172-176. (rus)
 16. Pantelev D.A. Deformativnye i prochnostnye karakteristiki poliarmirovannogo fibrobetona [Deformative and strength characteristics of poly-reinforced fiber-reinforced concrete]. *Izvestiya KGASU*. 2015. No 3 (33). Pp. 133-139. (rus)
 17. Pukharenko Yu.V., Pantelev D.A., Morozov V.I., Magdeev U.H. Prochnost' i deformativnost' poliarmirovannogo fibrobetona s primeneniem amorfnoj metallicheskoj fibry [Strength and deformability of poly-reinforced fiber-reinforced concrete using amorphous metal fibers]. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2016. No 1. Pp. 107-111. (rus)
 18. Kostrikin M. P. Vliyanie dispersnogo armirovaniya na dolgovechnost' cementnyh betonov dlya dorozhnogo stroitel'stva [Influence of dispersed reinforcement on the durability of cement concrete for road construction]. *Aktual'nye problemy stroitel'stva: 70-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya studentov, aspirantov, molodyh uchenyh i doktorantov [Actual problems of construction: 70th International Scientific and Practical Conference of students, graduate students, young scientists and doctoral students]*. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. SPb., 2017. Pp 102 – 106. (rus)
 19. Zhavoronkov M.I. Opredelenie karakteristik razrusheniya i modulya uprugosti fibrobetona [Determination of fracture characteristics and elastic modulus of fiber-reinforced concrete]. *Izvestiya kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2015. No 3. Pp.114-120. (rus)
 20. Pukharenko Yu.V., Pantelev D.A., Zhavoronkov M.I. Metody opredeleniya karakteristik treshchinostojkosti fibrobetona [Methods for determining the characteristics of crack resistance of fiber-reinforced concrete]. *Sbornik nauchnyh trudov RAASN. T. 2*. 2019. Pp. 448-457. (rus)

Информация об авторах

Пухаренко Юрий Владимирович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ), г. Санкт-Петербург, Россия,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии строительных материалов и метрологии.

E-mail: tsik@spbgasu.ru

Кострикин Максим Павлович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ),
г. Санкт-Петербург, Россия,
аспирант.

E-mail: kostrikm@mail.ru

Information about authors

Pukhareno Yury V.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Saint-Petersburg, Russia,
doctor in tech. sc., prof., head. of the dep. of Technology of building materials and metrology.

E-mail: tsik@spbgasu.ru

Kostrikin Maxim P.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Saint-Petersburg, Russia,
post-graduate student.

E-mail: kostrikm@mail.ru