

УДК 699.8:624.1.002.3

Голованов В. И., Новиков Н. С., Павлов В. В., Антонов С. П.

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИБРОБЕТОНА ДЛЯ ТОННЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

В статье приводятся результаты исследований прочностных характеристик бетона с добавкой из полипропиленовой фибры и без добавки при воздействии температур в диапазоне 20–800 °С. Проведено сравнение прочностных свойств исследованных бетонных смесей. В ходе исследований установлено, что при использовании полипропиленовой фибры прочностные характеристики фибробетона по сравнению с бетоном без добавки фибры снижаются в среднем на 16 % как при нормальной температуре, так и при высоких температурах.

Ключевые слова: прочность на осевое сжатие, бетон, фибробетон, полипропиленовая фибра, температура.

Основным конструктивным элементом в тоннелях автодорожных и метрополитена являются железобетонные блоки обделки, которые эксплуатируются в условиях повышенной влажности. Ранее проведёнными исследованиями установлено [1, 2, 3], что железобетонные конструкции из тяжелого бетона с влажностью более 3,5 % при пожаре имеют склонность к взрывообразному (хрупкому) разрушению. Этот процесс может привести к откалыванию защитного слоя арматуры вследствие её прогрева до критической температуры и обрушению конструкции. Для уменьшения вероятности хрупкого разрушения бетона в строительных конструкциях тоннелей используют огнезащитные покрытия для снижения интенсивности нагрева бетона при пожаре или вводят добавки в бетон в виде различных видов фибры, что также уменьшает вероятность хрупкого разрушения [4, 5].

На сегодняшний день существует достаточно много исследований фибробетонов, так как армирование бетона фиброй позволяет повысить прочностные характеристики бетонов и конструкций из этого материала [6, 7]. Однако в данном направлении до сих пор остаются пробелы в области изучения прочностных характеристик и поведения бетонов с армированием фиброй при воздействии пожара. Поэтому целью данного исследования является получение экспериментальных данных о прочностных свойствах фибробетона с полипропиленовой фиброй при воздействии высоких температур и сравнение полученных прочностных характеристик бетона с отечественной и импортной полипропиленовой фиброй.

Для исследований прочности бетона с добавкой полипропиленовой фиброй и без добавки на осевое сжатие на заводе ОАО «Моспромжелезобетон» были изготовлены образцы в виде кубиков (размер 100×100×100 мм) из бетона, состоящего из вяжущего ПЦ I-500-Н, мелкого заполнителя –

кварцевого песка, крупного заполнителя – гранитного щебня фракции 5–15 мм и пластификатора – Glenium 51 [8]. Для образцов из фибробетона, помимо вышеприведенных ингредиентов, в бетонную смесь добавляли полипропиленовую фибру в количестве 1 кг/м³.

Во время проведения исследований использовалась отечественная и импортная полипропиленовая фибра марки ProZASK IGS PowerFil Pro. Длина волокон отечественной и импортной полипропиленовой фибры составляла, соответственно, 12 и 6 мм. Общий вид импортной полипропиленовой фибры представлен на *рисунке 1*.

При изготовлении бетонной смеси волокна фибры добавлялись в бетон и перемешивались в течение 15–20 мин – данное время замешивания позволяет волокнам фибры распределиться равномерно в бетонной смеси.

В ходе подготовки образцов каждой партии была присвоена маркировка:

- бетонные кубы без добавки фибры – К;
- бетонные кубы с отечественной полипропиленовой фиброй – Р;



Рисунок 1. Полипропиленовая фибра ProZASK IGS PowerFil Pro

– бетонные кубы с импортной полипропиленовой фиброй – А.

Исследования прочности фибробетона с полипропиленовой фиброй на осевое сжатие при высоких температурах нагрева образцов проводились по разработанной методике с учётом действующих норм [8]. Сущность этого метода заключается в определении прочности бетона посредством измерения усилий, разрушающих специально изготовленные и прогретые до определенных температур контрольные образцы бетона при их статическом нагружении с постоянной скоростью нарастания нагрузки и последующем вычислении напряжений при этих усилиях.

Перед проведением испытаний кубов на прочность их прогревали до постоянной температуры 200, 400, 600, 800 °С. После прогрева образцы были подвержены испытаниям на сжатие в специализированной лаборатории на гидравлическом прессе. Изменение прочности исследуемых составов в зависимости от температуры нагрева образцов представлено в *таблице*.

По результатам испытаний высчитывалась прочность прогретого бетона на осевое сжатие

по формуле $R = \alpha \frac{F}{A}$, где R – прочность на осевое

сжатие, МПа; α – переводной коэффициент, зависящий от размеров образца; F – разрушающая нагрузка, Н; A – средняя рабочая площадь образца, мм². Переводной коэффициент α зависит от размера бетонных образцов и принимается $\alpha = 0,95$ для бетонного куба со сторонами 100×100×100 мм [6].

После проведения исследований экспериментальные данные подверглись статистической обработке, а именно: регрессионному анализу. Данная обработка проводилась по методу наименьших квадратов при использовании программного обеспечения Microsoft office Excel [9].

Прочность на осевое сжатие образцов исследуемых составов в зависимости от температуры

Маркировка образцов	Температура образцов, °С				
	20	200	400	600	800
Прочность на осевое сжатие, R_c , МПа					
К	58,3	60,3	79,2	53,9	29,5
	46,6	50,7	72,8	47,5	26
Р	57	65,9	60,2	42,8	16,5
	47,5	66,5	57	44,3	17,4
А	47,5	57	77,6	41,2	20,6
	44,7	69,7	60,2	45,6	20

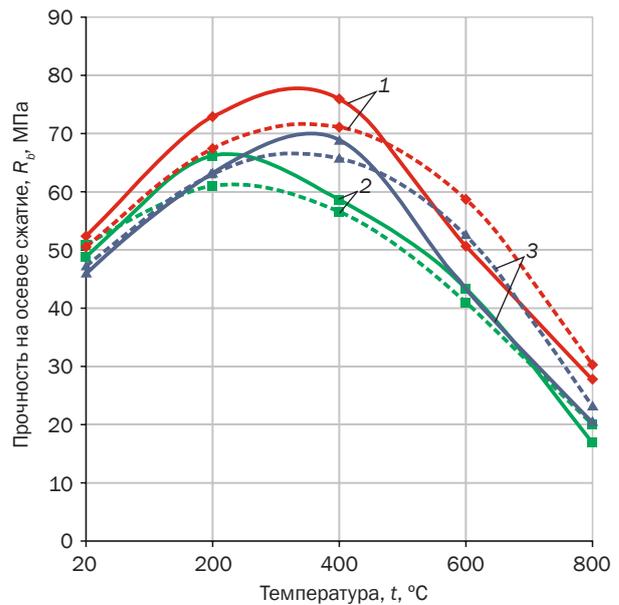


Рисунок 2. Температурные зависимости прочности на осевое сжатие бетона без добавки фибры и с добавкой:
 — экспериментальные кривые; — — расчётные кривые;
 1 – бетон без добавки фибры;
 2 – бетон с отечественной полипропиленовой фиброй;
 3 – бетон с импортной полипропиленовой фиброй

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных получены эмпирические зависимости для расчёта прочности на осевое сжатие бетона без армирования фиброй и бетонов с отечественной и импортной полипропиленовой фиброй в зависимости от температуры (рис. 2).

Эмпирические зависимости имеют следующий вид:

- для бетона без фиброармирования $R_b = -0,0002t^2 + 0,138t = 47,89$, где $R^2 = 0,78$;
- для фибробетона с отечественной полипропиленовой фиброй $R_b = -0,0002t^2 + 0,0993t = 48,91$, где $R^2 = 0,97$;
- для фибробетона с импортной полипропиленовой фиброй $R_b = -0,0002t^2 + 0,1332t = 44,548$, где $R^2 = 0,89$.

Коэффициент корреляции R^2 показывает тесноту связей между полученными экспериментальными данными. В нашем случае во всех уравнениях регрессии связь между переменными достаточно высокая. С помощью полученных выражений можно рассчитывать показатели прочности на осевое сжатие исследованных бетонов при различных температурах нагрева.

Результат проведенных экспериментов: полипропиленовая фибра снижает прочность бетона на сжатие примерно на 16 % как при нормальной температуре, так и при повышенной. В качестве гипотезы, объясняющей снижение прочности бетона, можно использовать предположение, что добавление полипропиленовой фибры в бетон

в количестве 1 кг/м^3 вытесняет такое же количество объёма цемента и мелкого наполнителя из структуры бетона и не позволяет набрать такую же прочность, как у обычного бетона. Второй причиной снижения прочности при нагреве возможно является низкая температура плавления полипропиленовой фибры, которая составляет всего $160 \text{ }^\circ\text{C}$ [10]. В результате нагрева фибробетона до температуры плавления полипропилена изменяется структура бетона, повышается его пористость, что приводит к уменьшению плотности и снижению прочности бетона.

Добавка полипропиленовых волокон в бетон не способна повысить прочность бетона даже при высоком процентном содержании фибры в составе бетона, поэтому данную фибру не следует использовать для повышения прочностных характеристик бетонов, но целесообразно использовать в качестве защиты материала от взрывообразного разрушения. Для повышения прочности бетона необходимо комбинировать полипропиленовую фибру с другими видами фибр, которые в одном случае будут защищать бетон от взрывообразного разрушения, в другом – повышать его прочность на сжатие и на растяжение.

Закономерности (визуальные) при разрушении образцов из бетона при нагреве с добавкой фибры и без добавки. В диапазоне температур $20\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$ для бетона без добавки фибры характерно разрушение образцов с хлопком, откалыванием кусков цементного камня и крупного заполнителя, разлетом этих частей на расстояния $2\text{--}3 \text{ м}$ (рис. 3). Называется это явление эффектом обоймы и происходит за счёт возникновения в месте соприкосновения опор пресса и оснований образцов силы трения, направленной от центра основания к сторонам образцов [11].



Рисунок 3. Образец из бетона без добавки фибры после проведения эксперимента

Разрушение бетонных образцов с добавкой фибры в данном интервале температур было пластичным, и бетонный куб практически не изменил свою форму (рис. 4).

При нагреве бетонных образцов без добавки фибры и с добавкой выше температуры $600 \text{ }^\circ\text{C}$ и воздействии нагрузки разрушение бетонных образцов происходит в виде рассыпания составляющих компонентов. Можно предположить, что по достижении высоких температур сцепление между основными компонентами в бетонной смеси практически отсутствует.

При сравнении прочностных свойств бетона с добавками из двух видов фибры видно, что на участке $20\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$ прочность на осевое сжатие отечественной полипропиленовой фибры выше импортной полипропиленовой фибры на 12% (см. рис. 2). На участке $300\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ отечественная полипропиленовая фибра уступает импортной примерно на 14% . Это можно объяснить разностью длин волокон отечественной и импортной фибры. Структура бетона с отечественной фиброй (длина волокон 12 мм) при нагреве становится более пористой, чем у бетона с импортной фиброй (длина волокон 6 мм) – при нагреве фибробетона происходит плавление полипропиленовых волокон, в результате чего и образуются поры в структуре бетона. Именно по этой причине прочность фибробетона с отечественной полипропиленовой фиброй незначительно снижается по отношению к импортной. Добавка в бетон отечественной фибры с меньшей длиной волокон позволит заменить использование импортной более дорогой фибры.

Анализ результатов испытаний показал, что характер кривых изменений прочности на сжатие при росте температуры бетона без добавки фибры и с добавкой одинаков для всех образцов,



Рисунок 4. Образец из бетона с добавкой полипропиленовой фибры после проведения эксперимента

участвовавших в испытаниях (см. рис. 2). В интервале температур от 20 до 300 °С происходит набор прочности, который характерен для бетона с добавкой фибры и без добавки. В интервале температур от 300 до 800 °С в связи с происходящими процессами дегидратации и термической диссоциации прочность снижается.

Авторы статьи пришли к выводу, что добавка полипропиленовых волокон в бетон не способ-

на повысить прочность бетона даже при высоком процентном содержании фибры в составе бетона. Поэтому данную фибру не следует использовать для повышения прочностных характеристик бетонов, а целесообразно использовать в качестве защиты материала от взрывообразного разрушения. Для обеспечения более высокой прочности бетона стоит комбинировать полипропиленовую фибру с другими видами фибр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голованов В. И., Кузнецова Е. В. Эффективные средства огнезащиты для стальных и железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 9. – С. 82–90.
2. Голованов В. И., Павлов В. В., Пехотиков А. В. Защита железобетонных туннелей автодорожных тоннелей от хрупкого разрушения при пожаре // Пожарная безопасность. – 2008. – № 2. – С. 50–55.
3. Dehn F., Werther N., Knitl J. Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig // Beton- und Stahlbetonbau, 2006, Nr. 101, Heft 8, S. 631–635. DOI: 10.1002/best.200608186.
4. Новиков Н. С. Огнестойкость и прочность конструкций из фибробетона [Электронный источник] // Технологии технологической безопасности. – 2016. – № 3 (67). – С. 122–127. Режим доступа: <http://academygps.ucoz.ru/ttb/2016-3/2016-3.html> (Дата обращения 24.05.2017 г.).
5. Яковлев А. И. Расчёт огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.
6. Лесовик Р. В., Клюев С. В. Фибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках Курской магнитной аномалии для изгибаемых конструкций // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – Т. 29, № 3. – С. 41–47. DOI: 10.5862/МСЕ.29.5.
7. Вахмистов А. И., Морозов В. И., Пухаренко Ю. В., Дмитриев А. Н., Магдеев У. Х. Эффективные фиброармированные материалы и изделия для строительства // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 10. – С. 43–44.
8. ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартинформ, 2013. – 35 с.
9. Венцель Е. С. Теория вероятностей. Учебник. – 11-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2010. – 664 с.
10. Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire // Cement and Concrete Research. – 2010. – № 40. – С. 1547–1554.
11. Байков В. Н., Сигалов Э. Е. Железобетонные конструкции. Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. – М.: Стройиздат, 1985. – 728 с.

Материал поступил в редакцию 09 декабря 2016 года.

Golovanov V., Novikov N., Pavlov V., Antonov S.

STRENGTH CHARACTERISTICS OF FIBER REINFORCED CONCRETE FOR TUNNEL STRUCTURES IN HIGH TEMPERATURES

ABSTRACT

Purpose. The article provides the results of the research of strength characteristics of concrete with and without addition of polypropylene fiber at the exposure to temperatures ranging between 20–800 °C.

Methods. The research of the strength of fiber reinforced concrete with polypropylene fiber and concrete without additives at axial compression at high temperatures of heating the samples was carried out according to the developed technique, taking into account the applicable standards specified in State Standard GOST 10180-2012 “Concrete. Methods of determining strength by check samples”.

Findings. In the research it was defined that in case of using polypropylene fiber, the strength characteristics of fiber reinforced concrete compared to concrete without fiber supplements reduce by 16 % on the average both at normal temperatures and at high temperatures.

Research application field. Analytical dependences for determining strength characteristics

of concrete at axial compression with the addition of domestic and imported fiber have been obtained. Also, these results are used to determine fire resistance of structures based on fiber reinforced concrete with polypropylene fiber.

Conclusions. The addition of polypropylene fibers to concrete cannot increase the concrete strength even with a high percentage of fiber in the concrete composition. Therefore, this fiber should not be used to increase the strength characteristics of the concrete, but it is advisable to be used as protection of the material from the explosive destruction. To provide higher concrete strength it is recommended to combine polypropylene fiber with other types of fibers.

Key words: strength at axial compression, concrete, fiber reinforced concrete, polypropylene fiber, temperature.

REFERENCES

1. Golovanov V.I., Kuznetsova E.V. Effective means of fire protection for steel and concrete structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 9, pp. 82–90. (in Russ.).
2. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Protection of reinforced concrete tubing of road tunnels against brittle fracture during a fire. *Pozharnaya bezopasnost'*, 2008, no. 2, pp. 50–55. (in Russ.).
3. Dehn F., Werther N., Knitl J. *Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig*. Beton- und Stahlbetonbau, 2006, Nr. 101, Heft 8, S. 631–635. DOI: 10.1002/best.200608186. (in Germ.).
4. Novikov N.S. Fire resistance and strength of reinforced concrete structures made of fiber-reinforced concrete. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti: internet-zhurnal*, 2016, no. 3 (67), pp. 122–127, available at: <http://academygps.ucoz.ru/ttb/2016-3/2016-3.html> (accessed May 24, 2017). (in Russ.).
5. Yakovlev A.I. *Raschet ognestoikosti stroitel'nykh konstruksii* [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1988. 144 p.
6. Lesovik R.V., Kliuev S.V. Fiber-concrete on composite astringent and man-made sands of the Kursk magnetic anomaly for bent structures. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*, 2012, vol. 29, no. 3, pp. 41–47. DOI: 10.5862/MCE.29.5
7. Vakhmistrov A.I., Morozov V.I., Pukhareno Ju. V., Dmitriyev A.N., Magdeev U.Kh. Efficient fiber-reinforced. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2007, no. 10, pp. 43–44. (in Russ.).
8. State standart 10180–2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow, Standart Publ., 2013. 35 p. (in Russ.).
9. Venttsel' E.S. *Teoriya veroiatnostei* [Theory of Probability]. Moscow, KNORUS Publ., 2010. 664 p.
10. Young-Sun Heo, Jay G. Sanjayan, Cheon-Goo Han, Min-Cheol Han. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire. *Cement and Concrete Research*, 2010, no. 40, pp. 1547–1554. (in Engl.).
11. Baikov V.N., Sigalov E.E. *Zhelezobetonnyye konstruksii* [Reinforced concrete structures]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1985. 728 p.

VLADIMIR GOLOVANOV	Grand Doctor of Philosophy in Engineering Sciences State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia
NIKOLAY NOVIKOV	State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia
VLADIMIR PAVLOV	All-Russian Research Institute for Fire Protection of EMERCOM of Russia, Moscow region, Balashikha, Russia
SERGEI ANTONOV	Ltd “Prozask”, Moscow, Russia