

Исследование прочностных свойств бетона, армированного полипропиленовой фиброй

А.О. Хегай, У.А. Щенецкова

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Одним из перспективных строительных материалов является фибробетон. Однако наибольшее распространение он получил в использовании в отделочных материалах, изготовлении малых архитектурных форм, промышленных полах, декоративных деталях фасадов, и гораздо реже – в несущих конструкциях. Между тем применение фибробетона, в т.ч. армированного низко модульной фиброй, в несущих конструкциях ограничено из-за недостаточности информации о поведении материала под нагрузкой, необходимы дополнительные экспериментальные данные для теоретических представлений. В статье рассмотрены экспериментальные исследования бетона, армированного полипропиленовой фиброй на сжатие и центральное растяжение. Были выявлены качественно отличные картины разрушения бетонных и фибробетонных образцов. Анализ результатов показал, что наибольшие значения пиковой нагрузки наблюдаются у образцов с содержанием полипропиленовой фибры 1%. По сравнению с контрольной серией несущая способность увеличилась до 45%. При увеличении содержания фибры до 2,5% среднее значение разрушающей нагрузки снизилось на 24%.
Ключевые слова: фибробетон, фибра, полипропиленовая фибра, испытания на сжатие.

Во все времена в строительной сфере осуществлялся поиск материалов, отличающихся надежностью, износостойкостью, долговечностью. В первую очередь это вызвано необходимостью оптимизации использования ресурсов, повышением надежности строительных конструкций. Одним из таких материалов является фибробетон [1].

Фибробетон, армированный полипропиленовой фиброй, представляет собой тип дисперсно-армированного бетона, в котором мелкие синтетические волокна вводятся в бетонную смесь для повышения её механических характеристик. Благодаря полипропиленовой фибре значительно увеличивается трещиностойкость, ударная вязкость, устойчивость к динамическим и термическим нагрузкам и др. [2, 3].

История применения волокнистых материалов в строительстве уходит корнями в глубокую древность. Опытным путем было обнаружено, что

добавление натуральных волокон, таких, как конский волос, солома, существенно улучшает прочностные характеристики глиняных кирпичей [4].

Изначально технология дисперсного армирования не рассматривалась как самостоятельное направление, а воспринималась в качестве вспомогательного метода к традиционному стержневому армированию. Значительную роль в развитии фибробетона в строительной науке сыграл выдающийся русский инженер В.П. Некрасов, чьи исследования заложили основу современного понимания дисперсно-армированных бетонов [5]. Также Некрасову В.П. принадлежат и первые теоретические выкладки по расчету фибробетонных конструкций.

Несмотря на очевидные достоинства, в современном строительстве фибробетон в большей степени используют в отделке, изготовлении малых архитектурных форм, промышленных полах, декоративных деталях фасадов, и гораздо реже – в несущих конструкциях. Примером использования фибробетона являются гидротехнические сооружения – дамбы, противофильтрационные завесы [6], также можно отметить опыт строителей Китая в использовании фибробетона при строительстве тоннелей [7].

Между тем, применение фибробетона, в т.ч. армированного низко модульной фиброй, в несущих конструкциях ограничено из-за недостаточности информации о поведении материала под нагрузкой, необходимы дополнительные экспериментальные данные для теоретических представлений [8, 9].

С физико-механической точки зрения полипропиленовая фибра работает как малые армирующие элементы, которые поглощают энергию трещинообразования и задерживают распространение трещин. Это позволяет существенно повысить предел прочности на растяжение при изгибе, ударную прочность даже при невысоком проценте армирования [10-12].

Для решения поставленной задачи было изготовлено 30 образцов – призм, размерами $100 \times 100 \times 400$ мм для испытания на сжатие и растяжение. В образцах варьировался процент фибрового армирования – $\mu_f = 1\%$, $\mu_f = 2,5\%$. Для определения прочности бетона были изготовлены кубы размерами $100 \times 100 \times 100$ мм. В качестве армирующего волокна использовалась полипропиленовая фибра $l_f = 12$ мм, $d_f = 25$ мкм производства «KrossAnkor».

Последовательность изготовления образцов была следующая: в бетоносмеситель принудительного действия постепенно вводились песок, цемент, вода, добавки, далее небольшими порциями добавлялась полипропиленовая фибра. В предварительно подготовленную форму укладывалась фибробетонная смесь (рис.1, рис.2.). Уплотнение бетона производилось на вибростоле. Формование призм производилось в горизонтальном положении. Все образцы проходили тепловлажностную обработку (ТВО) в течение 8 часов. После ТВО образцы хранились при 100% влажности и $T = 22 \pm 2$ °С, в течение 28 суток [13, 14].



Рис. 1. – Общий вид заформованных образцов

Результаты

По итогам обработки экспериментальных данных были получены следующие результаты испытания на сжатие (табл. №1, рис.2).

Таблица № 1

Результаты испытания на сжатие образцов – кубов

№ п/п	Процент фибрового армирования μ_f	Разрушающая нагрузка, кН	Коэффициент вариации, %
1	0%	40	7,6
2	1%	42	9,9
3	2.5%	37	7

Примечание: в таблице представлены средние значения

На рис.2 показан график распределения значений разрушающей нагрузки по каждому образцу.

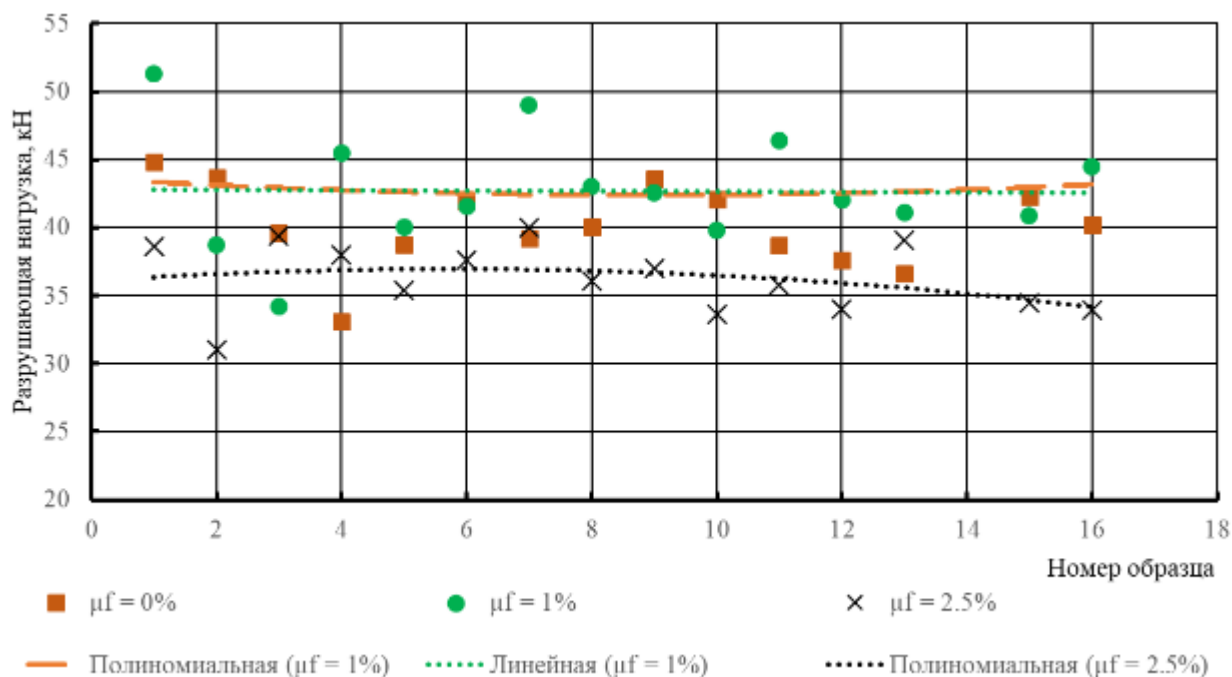


Рис. 2. – График распределения результатов измерений разрушающей нагрузки по каждому образцу куба на сжатие

На рис.3 представлен график зависимости разрушающей нагрузки от процента фибрового армирования. График построен по средним значениям (см. табл. №1).

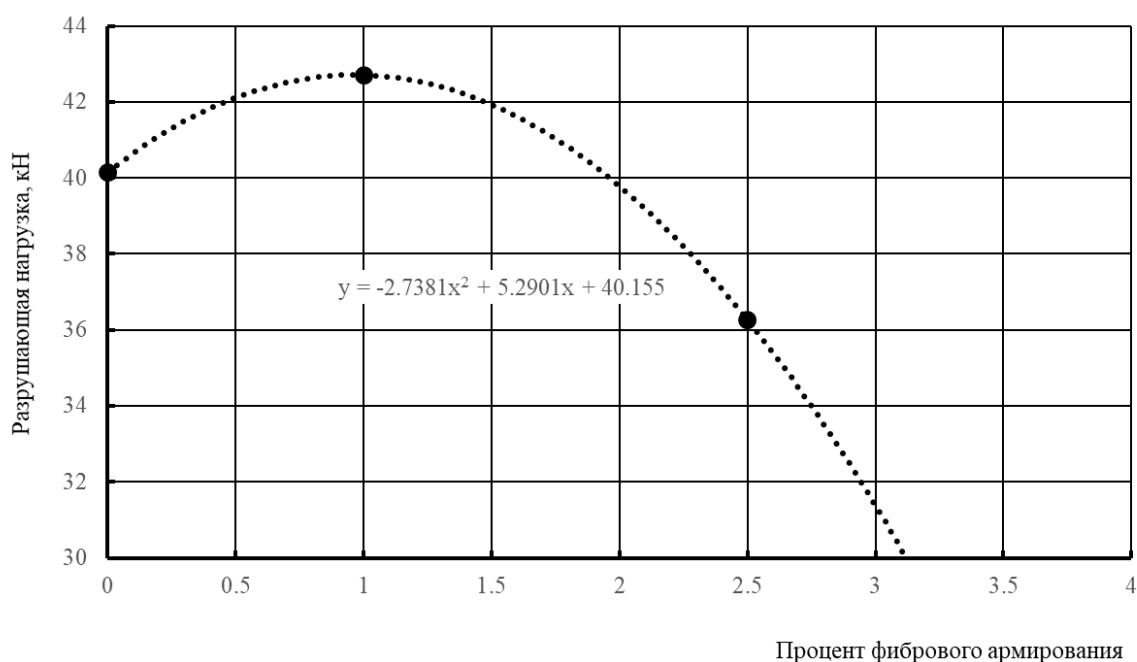


Рис. 3. – Зависимость разрушающей нагрузки от процента фибрового армирования образцов кубов при испытании на сжатие

Результаты испытаний (рис.2, рис.3) показали, что добавление фибры незначительно влияет на прочность образцов кубов на сжатие. Максимальный прирост наблюдается при 1% фибрового армирования, прирост составил 5%. При этом избыточное добавление фибры до 2,5 способствовало снижению прочности образцов кубов на сжатие до 8%. Вероятной причиной этого является ухудшение удобоукладываемости смеси, перераспределение воды затворения и формирование дополнительных пустот, негативно сказывающихся на уплотнённости и однородности материала.



Рис. 4. – Общий вид разрушенных образцов кубов
слева $\mu_f = 1\%$ фибры; справа $\mu_f = 2,5\%$ фибры

Несмотря на незначительное увеличение прочности на сжатие, характер разрушения менялся кардинально: с хрупкого на пластический. Образец без фибры продемонстрировал стандартное хрупкое разрушение по типу песочных часов. В образце с содержанием фибры 1% наблюдались множественные микротрещины, преимущественно вертикальной и диагональной направленности, при этом целостность образца частично сохраняется. Наиболее выраженный эффект повышения трещиностойкости был зафиксирован у образца с 2,5% фибры (см. рис. 4): разрушение носит поверхностный характер, сквозные трещины отсутствуют, структура сохраняет форму даже после достижения предельной нагрузки. Выступающая по поверхности фибра препятствует расслоению и снижает интенсивность раскрытия трещин, что указывает на высокую энергоемкость разрушения фибробетона при увеличенном содержании армирующих волокон.

Испытания образцов призм на центральное растяжение происходило с помощью зажимных захватов в соответствии с ГОСТ 10180-2012. Общий вид

образца при испытании представлен на рис.5. Общий вид разрушенных образцов представлен на рис.6.



Рис. 5. – Общий вид испытуемых образцов – призм на растяжение



Рис. 6. – Общий вид разрушенных образцов призмы на растяжение.
с 2,5% содержанием фибры

Анализ экспериментальных данных (табл. 2, рис. 7) показал, что наибольшие значения пиковой нагрузки наблюдаются у образцов с содержанием полипропиленовой фибры 1%.

Таблица № 2

Результаты испытания на растяжение образцов - призм

№ п/п	Процент фибрового армирования μ_f	Разрушающая нагрузка, кН	Коэффициент вариации, %
1	0%	14,5	11,9
2	1%	21	11,4
3	2.5%	11	17,8

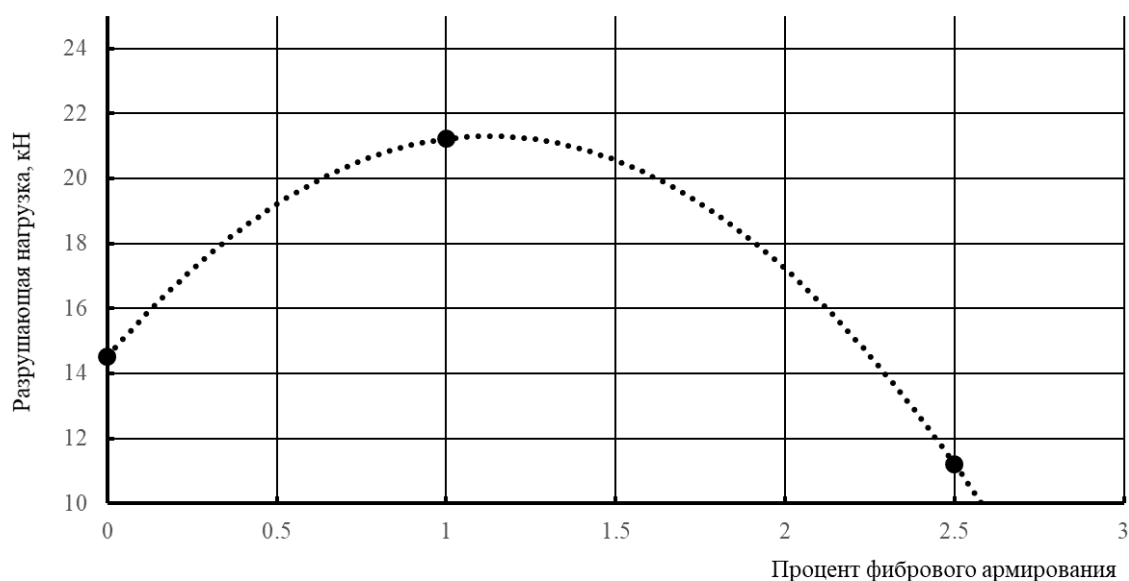


Рис. 7. – Зависимость разрушающей нагрузки от процента фибрового армирования при испытании образцов призм на растяжение

При увеличении содержания фибры до 2,5% среднее значение разрушающей нагрузки снизилось на 24%, по аналогии с образцами-кубами.

На основе данных, полученных при растяжении образцов, образцы с $\mu_f = 1\%$ характеризуются наиболее устойчивым и плавным характером роста

напряжений до достижения максимального значений. Это указывает на наличие выраженной пластической стадии и эффективную работу фибры, замедляющую распространение трещин, что соответствует вязкоупругому типу поведения материала и указывает на его высокую энергоемкость.

В отличие от этого, образцы серии $\mu_f = 0$ демонстрируют более резкий обрыв после достижения пика, что соответствует хрупкому типу разрушения, типичному для неармированного бетона. Наличие короткой стадии пластической деформации свидетельствует о неэффективном сопротивлении росту трещин при отсутствии фибры.

Для образцов с процентом фибрового армирования $\mu_f = 2,5 \%$ характерны как множественные локальные скачки напряжений, так и неустойчивый рост нагрузки. В некоторых случаях после достижения максимального значения разрушающей нагрузки наблюдалось снижение, а затем повторный рост нагрузки.

Заключение

По итогам проведенного лабораторного эксперимента можно сделать вывод о том, что введение полипропиленовой фибры в большей степени влияет на поведение образца под нагрузкой, а также на прочность при растяжении. Введение полипропиленовой фибры в матрицу бетона приводит к незначительному повышению прочности на сжатие.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГАСУ на 2025 год.

Литература

1. Окольникова Г.Э., Белов А.П., Слинькова Е.В. Анализ свойств различных видов фибробетонов. // Системные технологии. 2018. №26. С. 206-210.

2. Jianzhe Shi, Fiber-Reinforced Polymers and Fiber-Reinforced Concrete in Civil Engineering // MDPI. 2023. №13 (7). URL: mdpi.com/2075-5309/13/7/1755.
3. Fediuk R., Amran M., Klyuev S., Klyuev A Increasing the Performance of a Fiber-Reinforced Concrete for Protective Facilities // MDPI. 2021. №9(11) URL: mdpi.com/2079-6439/9/11/64.
4. Porter H.F Preparation of Concrete from selection of materials to final disposition // Proceedings of the National Association of Cement Users. 1910. №6. p. 296.
5. Некрасов, В.П. Новейшие приемы и задачи железобетонной техники // «Зодчий». 1908. №19. С. 173-174.
6. Ramos E.V., Gomes J.S., Lopes D.J., Montalban A. Polypropylene Fibre Reinforced Concrete for the Structural Panels of the Pavillions of the Motril Port (Spain) // Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations II (BEFIB 2021). 2021. pp. 771–779.
7. Zhou T., Hua Y The Practical Application of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete in China Railway Tunnel Lining Structure Within Hard and Weak Rockmass // ISRM SINOROCK. 2013.
8. Ahmad J., Burduhos-Nergis D.D., Arbili M.M., Alogha S.M., Majdi A., Deifalla A.F. A Review on Failure Modes and Cracking Behaviors of Polypropylene Fibers Reinforced Concrete // MDPI. 2022. №12(11). URL: mdpi.com/2075-5309/12/11/1951.
9. Saje D., Bandelj B., Sustersic J., Lopatic J. Shrinkage of Polypropylene Fiber-Reinforced High-Performance Concrete // Journal of Materials in Civil Engineering. 2011. №23 (7). pp. 941-952.
10. .Полторан Я.Е, Фибробетон для промышленного и гражданского строительства // Молодежь и научно-технический прогресс: сборник докладов X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2017. №3. С. 166-169.

11. Шляхтина Т.Ф. Термическая трещиностойкость фибробетонов // Инженерное дело на Дальнем Востоке России: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, Владивосток. 2023. С. 203-207.

12. Белоусов И.В., Шилов А.В., Меретуков З.А., Маилян Л.Д. Применение фибробетона в железобетонных конструкциях // Инженерный вестник Дона. 2017. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4421.

13. Дураченко А.В. Ускорение твердения фибробетонов // Молодежь и научно-технический прогресс: сборник докладов X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2017. №3. С. 97-99.

14. Чупрова Е.Е., А.О. Хегай, Т.С. Хегай, О.Н. Хегай, Экспериментальные исследования полиармированного фибробетона // Инженерный вестник Дона. 2025. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2025/10441.

References

1. Okol'nikova G.Je, Belov A.P., Slin'kova E.V. Sistemnye tehnologii. 2018. №26. pp. 206-210.

2. Jianzhe Shi, MDPI». 2023. №13 (7). URL: mdpi.com/2075-5309/13/7/1755.

3. Fediuk R., Amran M., Klyuev S., Klyuev MDPI. 2021. №9 (11). URL: mdpi.com/2079-6439/9/11/64.

4. Porter H.F Proceedings of the National Association of Cement Users. 1910. №6. p. 296.

5. Nekrasov, V.P. «Zodchij». 1908. №19. pp. 173-174.

6. Ramos E.V., Gomes J.S., Lopes D.J., Montalban A. Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations II (BEFIB 2021). 2021. pp. 771–779.

7. Zhou T., Hua Y The Practical, ISRM SINOROCK. 2013.

8. Ahmad J., Burduhos-Nergis D.D., Arbili M.M., Alogha S.M., Majdi A., Deifalla A.F. MDPI. 2022. №12 (11). URL: mdpi.com/2075-5309/12/11/1951.

9. Saje D., Bandelj B., Sustersic J., Lopatic J. Journal of Materials in Civil Engineering. 2011. №23 (7). pp. 941-952.
10. Poltoran, Ja.E. Molodezh' i nauchno-tehnicheskij progress: sbornik dokladov X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. 2017. №3. pp. 166-169.
11. Shljahtina T.F. T Inzhenernoe delo na Dal'nem Vostoke Rossii: Materialy VIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Vladivostok. 2023. pp. 203-207.
12. Belousov I.V., Shilov A.V., Meretukov Z.A., Mailjan L.D. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4421.
13. Durachenko A.V. Molodezh' i nauchno-tehnicheskij progress: sbornik dokladov X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. 2017. №3. pp. 97-99.
14. Chuprova E.E., A.O. Hegaj, T.S. Hegaj, O.N. Hegaj, Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2025/10441.

Дата поступления: 10.09.2025

Дата публикации: 28.10.2025