

УДК 691.328
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>
EDN: SPRCLI
Научная статья



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ БЕТОНОВ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ПРОЧНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ

Ю. В. Пухаренко^{1, 2}, Д. А. Пантелеев², М. И. Жаворонков^{2*}

¹Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), г. Санкт-Петербург, Россия

tsik54@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1989-0595>,
dm-pant@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6590-5033>,
sith07@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4056-5965>

*ответственный автор

*corresponding author

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью исследования являлась оценка эффективности дисперсного армирования бетонов по показателям прочности и трещиностойкости.

Материалы и методы. При проведении исследований применены методы испытаний, регламентируемые положениями национальных стандартов, применялось оборудование, специально разработанное для проведения настоящего исследования.

Результаты. Представлены результаты испытаний фибробетонов, изготовленных с применением низко модульных и высоко модульных волокон.

Обсуждение и заключение. В результате анализа приведенных данных показано, что для оценки эффективности и правильного выбора армирующих волокон недостаточно характеризовать фибробетон только прочностью на растяжение при изгибе. Для более точной оценки предлагается использовать характеристики трещиностойкости, например, критический коэффициент интенсивности напряжений или дополнять описание преимуществ дисперсного армирования особенностями поведения фибробетона под нагрузкой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фибробетон, трещиностойкость, прочность, низко модульная фибра, высоко модульная фибра, диаграмма деформирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет») в 2022 году.

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Оценка эффективности дисперсного армирования бетонов по показателям прочности и трещиностойкости // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 752-761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>

© , 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>

EDN: SPRCLI

EVALUATION OF DISPERSION REINFORCEMENT IN CONCRETE IN TERMS OF STRENGTH AND CRACK RESISTANCE

Yury V. Pukharensko^{1, 2}, Dmitrii A. Panteleev², Mikhail I. Zhavoronkov^{2*}

¹Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN), Moscow, Russia

²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia

tsik54@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1989-0595>,

dm-pant@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6590-5033>,

sith07@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4056-5965>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the study was to evaluate the effectiveness of dispersed concrete reinforcement in terms of strength and crack resistance.

Materials and methods. When conducting research, test methods were used, regulated by the provisions of national standards, equipment specially designed for this study was used.

Results. The results of testing fiber-reinforced concretes made using low-modulus and high-modulus fibers are presented.

Discussion and conclusions. As a result of the analysis of the data presented, it is shown that in order to assess the effectiveness and the correct choice of reinforcing fibers, it is not enough to characterise fiber-reinforced concrete only by tensile strength in bending. For a more accurate assessment, it is proposed to use crack resistance characteristics, for example, the critical stress intensity factor, or to supplement the description of the advantages of dispersed reinforcement with the features of the behavior of fiber-reinforced concrete under load.

KEYWORDS: fiber-reinforced concrete, crack resistance, strength, low-modulus fiber, high-modulus fiber, deformation diagram.

ACKNOWLEDGMENTS. The article is published based on the results of the research work carried out as part of the competition for research grants by scientific and pedagogical staff of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU) in 2022.

The article was submitted 14.07.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Pukharensko Yury V., Panteleev Dmitrii A., Zhavoronkov Mikhail I. Evaluation of dispersion reinforcement in concrete in terms of strength and crack resistance. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 752-761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>

© , 2022



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проводятся активные теоретические и экспериментальные исследования, связанные с подробным изучением свойств фибробетонов, изготовленных с применением различных видов армирующих волокон и цементных матриц [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Полученные результаты включают численные значения прочности, а также силовых и энергетических характеристик трещиностойкости, в том числе модуля упругости, джей-интеграла, критического коэффициента интенсивности напряжений и др. При этом наиболее простым и распространенным способом оценки эффективности дисперсного армирования и, соответственно, применяемой для этого фибры по-прежнему остается сравнение результатов испытаний прочности различных фибробетонов. Однако оценка только по прочности представляется недостаточно информативной и в ряде случаев может привести к формированию противоречивых выводов [11, 12, 13, 14]. Учитывая это, цель написания данной статьи и ее актуальность связаны с получением экспериментальных данных, указывающих на необходимость комплексной оценки эффективности дисперсного армирования бетонов одновременно по показателям прочности и трещиностойкости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для испытаний трещиностойкости использована методика, представленная в ГОСТ 29167, согласно которой проводили испытания стандартных образцов-балок на растяжение при изгибе, при этом строили диаграммы деформирования – графики зависимости прогибов образцов от прилагаемых нагрузок, и с их помощью определяли силовые и энергетические характеристики трещиностойкости [15, 16, 17, 18, 19, 20].

Испытаниям подвергались образцы-балки размерами 70×70×280 мм. В растянутых гранях образцов был сделан начальный надрез глубиной 25 мм. Образцы изготавливались из мелкозернистого бетона класса по прочности В20 при следующем расходе основных компонентов: цемент 450 кг/м³, песок 1670 кг/м³, вода 315 л/м³. Для приготовления фибробетонной смеси использован кварцевый песок $M_k = 2,3$ и бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108. Перемешивание фибробетонной смеси производилось в лабораторном двухвальном смесителе. Уплотнение смеси осуществлялось с помощью лабо-

раторной виброплощадки. Образцы твердели в шкафу нормального твердения при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и влажности более 95% в течение 28 сут.

Для дисперсного армирования применялась синтетическая полипропиленовая фибра *Fibrin XT*, длиной 12 мм и диаметром 0,025 мм, стальная проволоочная фибра круглого сечения волнового профиля диаметром 0,3 мм и длиной 22 мм, синтетическая полипропиленовая фибра *Durus S500* периодического профиля длиной 48 мм и эквивалентным диаметром 0,7 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 1 приведены диаграммы деформирования образцов мелкозернистого фибробетона без волокон, а также армированного низко модульной фиброй *Durus S500*. Содержание фибры составляло 0,5% и 1,0% по объему.

По рисунку 1 видно, что разрушающая нагрузка неармированного образца составила 1,7 кН, а соответствующий ей прогиб – 0,056 мм. После прохождения точки с данными координатами кривая деформирования становится резко нисходящей, что свидетельствует о хрупком характере разрушения.

Диаграммы деформирования образцов, армированных фиброй *Durus S500*, в области, близкой к началу координат, практически повторяют аналогичный график неармированного образца. После достижения нагрузки, приводящей к разрушению матрицы, диаграммы фиброармированных образцов также приобретают нисходящий, но более плавный характер, снижаясь до нагрузок 0,5...1,5 кН, в зависимости от содержания фибры в составе композита (рисунок 1, слева). После этого нагрузка снова начинает возрастать, достигая значений 3,0...5,5 кН, а затем плавно снижается до нуля. Повторный подъем нагрузки и ее дальнейшее плавное снижение вплоть до разрушения обусловлены особенностями поведения под нагрузкой фибробетона, армированного низко модульной фиброй: в момент появления трещины в матрице сцепление с ней волокон не нарушается, и начинается их удлинение, обусловленное низким модулем упругости. Этот процесс требует определенных усилий, что и объясняет повторное повышение нагрузки, которую воспринимает образец и которая при определенном содержании волокон может достигать значительных величин.

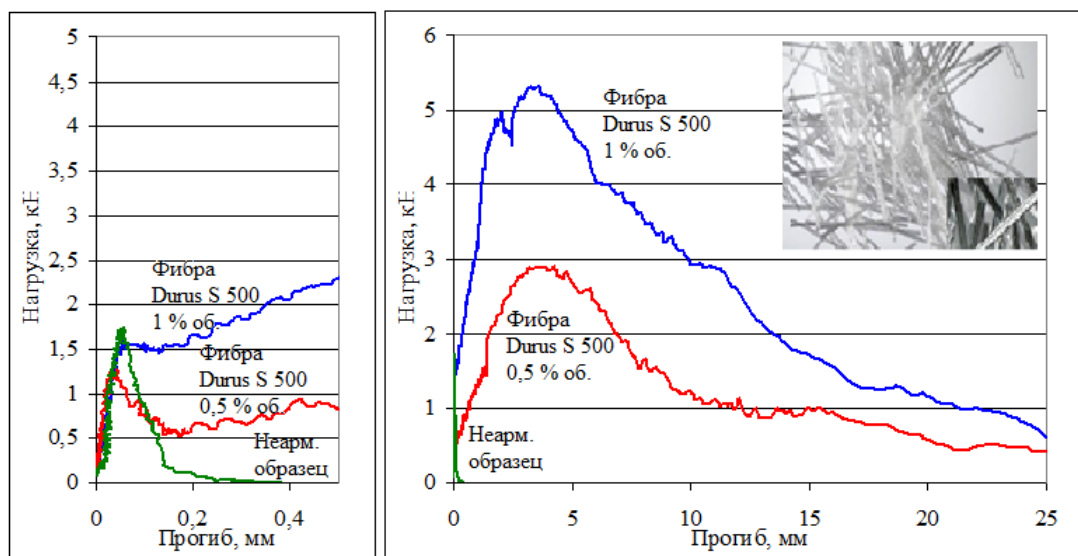


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования фибробетонных образцов, армированных фиброй Durus S 500: укрупненный фрагмент диаграмм деформирования (слева); полные диаграммы деформирования (справа)
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Diagrams of deformation of fiber-reinforced concrete samples reinforced with Durus S500 fiber: enlarged fragment of deformation diagrams (left); full deformation diagrams (right)
Source: Compiled by the authors.

Таким образом, прочность фибробетона с низко модульными волокнами, рассчитанная по максимальному значению нагрузки, зафиксированной в ходе испытания, может оказаться довольно высокой.

Так, прочность на растяжение при изгибе неармированного образца составила 4,78 МПа, образца с 0,5% фибры Durus S500 уже 8,1 МПа, а образца, армированного 1,0% фибры по объему, 14,9 МПа. В то же время важно отметить, что прогибы фиброармированных образцов в момент достижения максимальной нагрузки могут в десятки раз превысить прогиб неармированного образца и таким образом оказаться выше допустимых значений.

Аналогичную особенность можно проследить и в случае применения для армирования цементных композитов низко модульной фибры другого вида.

На рисунке 2 представлены диаграммы деформирования образцов, армированных низко модульной фиброй Fibrin XT, по которым прослеживается тот же механизм разрушения, что и в случае использования волокон Durus S500: вначале наблюдается момент растрескивания матрицы, по величине нагрузки совпадающий с моментом разрушения

неармированного образца, затем процесс перераспределения усилий преимущественно на волокна и повторное повышение нагрузки после их некоторого удлинения. При этом так же, как и в предыдущем случае, нагрузка принимает более высокие значения в случае большего расхода волокон.

Иначе выглядит на графиках процесс деформирования и разрушения фибробетона, изготовленного с применением высоко модульных волокон в виде стальной проволоочной фибры (рисунок 3).

По полученным диаграммам видно, что для сталефибробетона характерно увеличение предела пропорциональности: нагрузка в момент появления первой трещины значительно превышает разрушающую нагрузку неармированного образца при одинаковом с ним прогибе. В дальнейшем фибробетонный образец последовательно переходит в стадии упругопластического и пластического деформирования с увеличением нагрузки и прогибов. При этом характерного сброса значений по вертикальной оси графиков, как это было при использовании низко модульных волокон, не происходит, а величина прогибов оказывается в несколько раз меньше и составляет 1,2...1,4 мм.

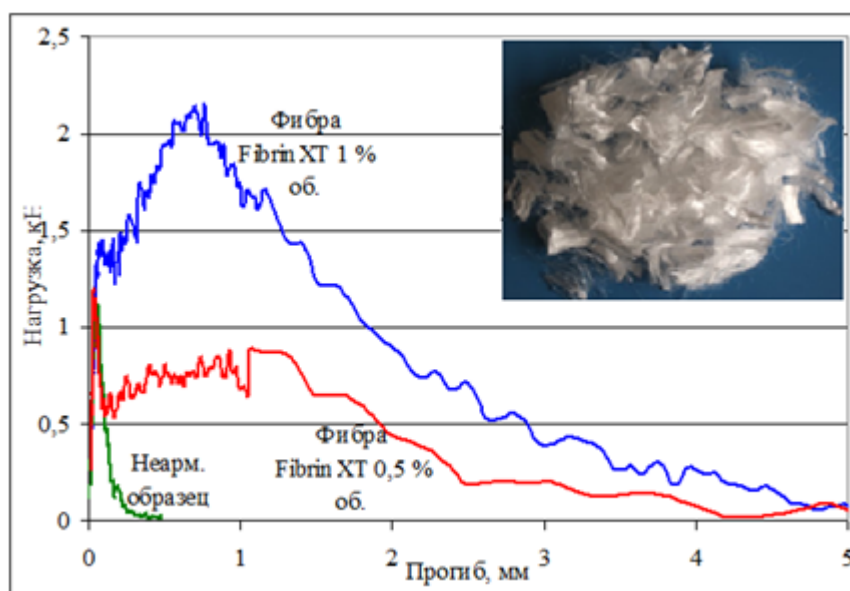


Рисунок 2 – Диаграммы деформирования фибробетонных образцов, армированных фиброй Fibrin XT
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Diagrams of deformation of fiber-reinforced concrete samples reinforced with Fibrin XT fiber
Source: Compiled by the authors.

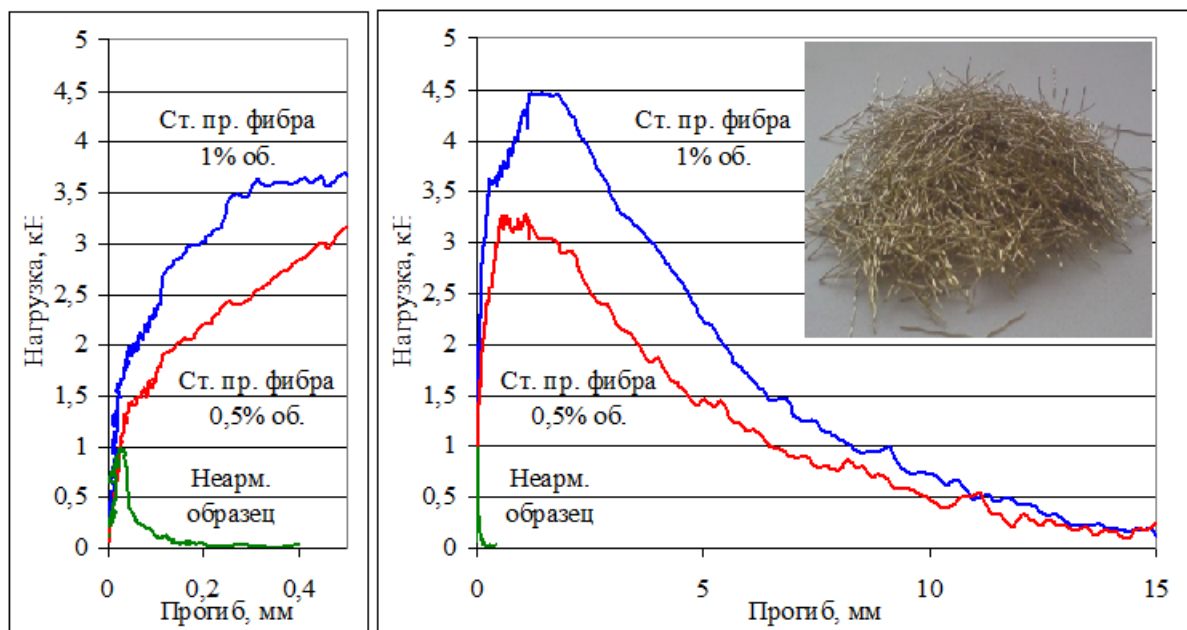


Рисунок 3 – Диаграммы деформирования фибробетонных образцов, армированных стальной проволочной фиброй:
укрупненный фрагмент диаграмм деформирования (слева);
полные диаграммы деформирования (справа)
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Diagrams of deformation of fiber-reinforced concrete samples reinforced with steel wire fibers: enlarged fragment of deformation diagrams (left); full deformation diagrams (right)
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что дисперсное армирование бетона низкомодульной фиброй не в состоянии сдерживать процесс образования и развития трещин, но при определенном насыщении волокнами может способствовать повышению прочности. При этом значения предельных деформаций также будут составлять весьма значительную величину, что может оказаться неприемлемым по характеру и условиям работы конструкции. Таким образом, оценку эффективности дисперсного армирования только по результатам испытаний прочности следует считать недостаточно информативной и для повышения ее объективности предлагается дополнительно использовать численные значения характеристик трещиностойкости, например, коэффициент интенсивности напряжений. В механике разрушения эта величина характеризует способность материала сопротивляться образованию и развитию трещин. Согласно ГОСТ 29167, коэффициент интенсивности напряжений – величина, определяющая напряженно-деформированное состояние и смещения вблизи вершины трещины.

На рисунках 4 и 5 показаны графики зависимости коэффициента интенсивности напряжений и прочности бетона и фибробетона в зависимости от объемного содержания волокон *Durus S500* и *Fibrin XT*, полученные в ходе обработки представленных выше диаграмм.

На рисунках видно, что прочность фибробетона повышается, особенно при достаточно высоком насыщении бетона волокнами (в данном случае 1% об.). При этом коэффициент интенсивности напряжений остается неизменным при любом содержании волокон. Это значит, что матрица в фибробетоне с низкомодульными волокнами разрушается, и в ней появляются трещины примерно при тех же нагрузках, что и при отсутствии армирования, и эффект ее упрочнения в данном случае отсутствует. Таким образом, введение в состав бетона низкомодульных волокон не приводит к повышению его трещиностойкости.

На рисунке 6 представлены графики зависимости коэффициента интенсивности напряжений и прочности образцов на растяжение при изгибе от объемного содержания стальной проволочной фибры, из которых следует, что обе исследуемые характеристики повышаются пропорционально объемному содержанию волокон.

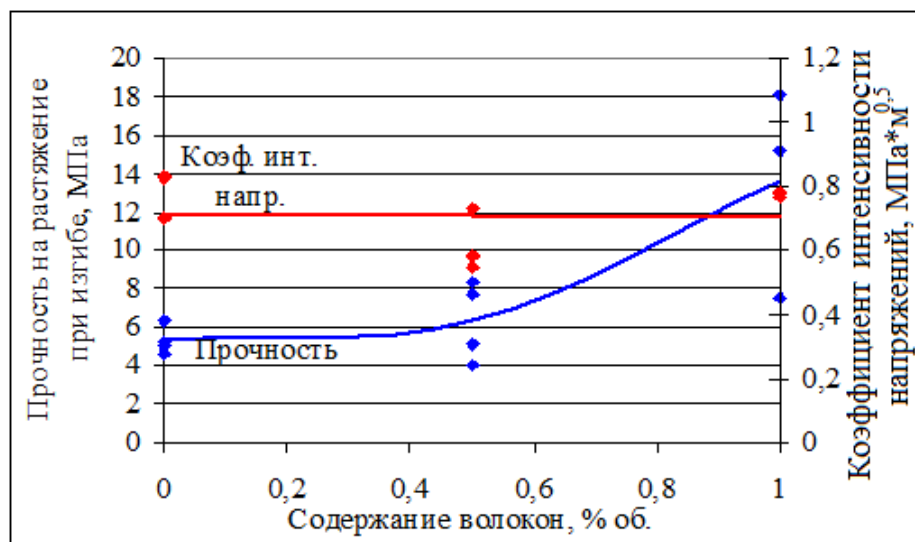


Рисунок 4 – Зависимость прочности и коэффициента интенсивности напряжений от объемного содержания фибры *Durus S500*
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of strength and stress intensity factor on the volume content of *Durus S500* fiber
Source: compiled by the authors.

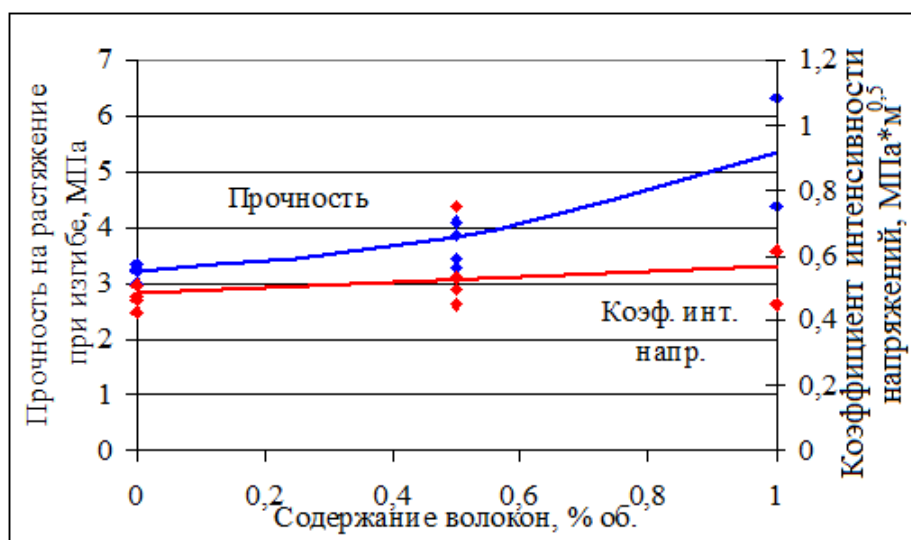


Рисунок 5 – Зависимость прочности и коэффициента интенсивности напряжений от объемного содержания фибры Fibrin XT
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of strength and stress intensity factor on the volume content of Fibrin XT fiber
Source: compiled by the authors.

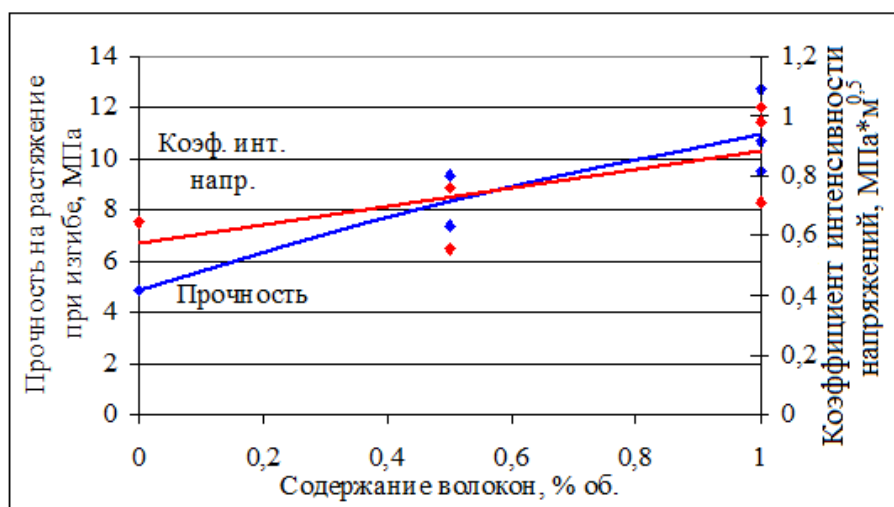


Рисунок 6 – Зависимость прочности и коэффициента интенсивности напряжений от объемного содержания стальной проволочной фибры
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependence of strength and stress intensity factor on the volume content of steel wire fiber
Source: compiled by the authors.

В результате проведенного анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что для полной и объективной оценки эффективности дисперсного армирования бетонов низко модульными волокнами недостаточно характеристики прочности и требуется дополнительно указывать характеристику трещиностойкости, например, коэффициента интенсивности напряжений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Влияние вида фибры и состава матрицы на их сцепление в фибробетоне. *Вестник СибАДИ*. 2022;19(3):436–445. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445>
2. Пухаренко Ю. В., Морозов В. И., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Определение прочности сцепления армирующих волокон с матрицей в фибробетоне. *Строительные материалы*. 2020. № 3. С. 39–43.
3. Кострикин М. П. Эффективность дисперсного полиармирования бетона низко модульными волокнами // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 2 (85). С. 128–133.
4. Чернышов Е. М., Коротких Д. Н. Определяющие соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 2 (58). С. 167–174.
5. Storm J. A comparative study of micro-mechanical models for fiber pullout behavior of reinforced high performance concrete / J. Storm, M. Kaliske, M. Pise, D. Brands, J. Schröder // *Engineering Fracture Mechanics*. 2021. V. 243. P. 107506.
6. Xu M. Development of basalt fiber engineered cementitious composites and its mechanical properties / Xu M., Song S., Feng L., Zhou J., Li H., Li V. C. // *Construction and Building Materials*. 2021. T. 266. P. 121173.
7. Степанов М. В., Моисеенко Г. А. Диаграммы деформирования мелкозернистого высокопрочного бетона и высокопрочного сталефибробетона при сжатии // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 3 (83). С. 11–21.
8. Лесовик В. С., Федюк Р. С. Композиты нового поколения для специальных сооружений // *Строительные материалы*. 2021. № 3. С. 9–17.
9. Travush V. I., Konin D. V., Krylov A. S. Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete // *Magazine of civil engineering*. 2018. № 1 (77). pp. 90–100.
10. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Издательство АСВ, 2004. 560 с.
11. Дураченко А. В. К вопросу применения фибробетонов для ремонта дорожных покрытий / А. В. Дураченко // Сборник докладов Международного онлайн-конгресса: фундаментальные основы строительного материаловедения. 2017. С. 303–306.
12. Белькова Н. А. Разработка составов фибробетона для устройства полов и стяжек / Н. А. Белькова, Э. И. Крюков, Д. А. Ткачева // *Химия, физика и механика материалов*. 2019. № 3 (22). С. 4–13.
13. Уткин Д. Г. Прочность изгибаемых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры / Д. Г. Уткин // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 1 (93). С. 85–95.
14. Уткин Д. Г. Прочность сжатых и внецентренно сжатых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры / Д. Г. Уткин // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 1 (99). С. 99–109.
15. Пухаренко Ю. В. Совершенствование методов определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фибробетона / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. Вып. 3. С. 301–310.
16. Колчунов В. И., Кузнецов К. Ю., Федоров С. С. Модель критерия трещиностойкости и прочности плосконапряженных конструкций из высокопрочного фибробетона и фиброжелезобетона // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 3 (95). С. 15–26.
17. Злепко А. Ю. Трещиностойкость фиброцемента армированного стальной проволоочной фиброй // *Молодой ученый*. 2020. № 6 (296). С. 57–61.
18. Зерцалов М. Г., Хотеев Е. А. Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости фибробетона // *Вестник МГСУ*. 2014. № 5. С. 91–99.
19. Коротких Д. Н. Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (часть 1) // *Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура*. Вып. 26. 2012. С. 56–67.
20. Коротких Д. Н. Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (часть 2) // *Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура*. Вып. 27. 2012. С. 54–62.

REFERENCES

1. Pukharens Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Influence of fiber type and matrix composition on adhesive strength in fiber reinforced concrete. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(3):436-445. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445>
2. Puharenko Yu. V., Morozov V. I., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. Opredelenie prochnosti scepneniya armiruyushchih volokon s matricej v fibrobetone [Determination of the bond strength of reinforcing fibers with a matrix in a fibrobeton]. *Stroitel'nye materialy*. 2020; 3: 39–43. (in Russ.)
3. Kostrikin M. P. Effektivnost' dispersnogo poliarmirovaniya betona nizkomodul'nymi voloknami [Efficiency of dispersed polishing of concrete with low-modulus fibers]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021; 2 (85): 128–133. (in Russ.)

4. Chernyshov E. M., Korotkih D. N. Opredelyayushchie sootnosheniya pokazatelej soprotivleniya razrusheniyu cementnyh betonov i parametrov ih struktury [Determining the ratios of indicators of resistance to destruction of cement concretes and parameters of their structure]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2015; 2 (58): 167–174. (in Russ.)

5. Storm J. A., Kaliske M., Pise M., Brands D., Schröder J. comparative study of micro-mechanical models for fiber pullout behavior of reinforced high performance concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021; 243: 107506.

6. Xu M., Song S., Feng L., Zhou J., Li H., Li V. C. Development of basalt fiber engineered cementitious composites and its mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2021; 266: 121173.

7. Stepanov M. V., Moiseenko G. A. Diagrammy deformirovaniya melkozernistogo vysokoprochnogo betona i vysokoprochnogo stalefibrobetona pri szhatii [Diagrams of deformation of fine-grained high-strength concrete and high-strength steel fiber concrete during compression]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2019; 3 (83): 11–21. (in Russ.)

8. Lesovik V. S. Fedyuk R. S. Kompozity novogo pokoleniya dlya special'nyh sooruzhenij [New generation composites for special structures]. *Stroitel'nye materialy*. 2021; 3: 9–17. (in Russ.)

9. Travush V. I., Konin D. V., Krylov A. S. Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete. *Magazine of civil engineering*. 2018; 1 (77): 90–100.

10. Rabinovich F. N. Kompozity na osnove dispersno armirovannyh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii [Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, design]. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2004. 560. (in Russ.)

11. Durachenko A. V. K voprosu primeneniya fibrobetonov dlya remonta dorozhnyh pokrytij/ A. V. Durachenko [On the use of fibrobetons for repairing road surfaces]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnogo onlajn-kongressa: fundamental'nye osnovy stroitel'nogo materialovedeniya*. 2017: 303–306. (in Russ.)

12. Bel'kova N. A., Kryukov E. I., Tkacheva D. A. Razrabotka sostavov fibrobetona dlya ustrojstva polov i styazhek [Development of fiber concrete compositions for the construction of floors and ties]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov*. 2019; 3 (22): 4–13. (in Russ.)

13. Utkin D. G. Prochnost' izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov s zonnym armirovaniem iz stal'noj fibry [Strength of bent reinforced concrete elements with zone reinforcement made of steel fiber]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2021; 1 (93): 85–95. (in Russ.)

14. Utkin D. G. Prochnost' szhatykh i vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnyh elementov s zonnym armirovaniem iz stal'noj fibry [Strength of compressed and eccentrically compressed reinforced concrete elements with zone reinforcement made of steel fiber]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2022; 1 (99): 99–109. (in Russ.)

15. Puharenko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. Sovershenstvovanie metodov

opredeleniya silovykh i energeticheskikh karakteristik treshchinostojkosti fibrobetona [Improving methods for determining the power and energy characteristics of fracture resistance of fibrobetone]. *Vestnik MGSU*. 2019. T. 14. Vyp. 3: 301–310. (in Russ.)

16. Kolchunov V. I., Kuznecova K. Yu., Fedorov S. S. Model' kriteriya treshchinostojkosti i prochnosti ploskonapryazhennykh konstrukcij iz vysokoprochnogo fibrobetona i fibrozhelezobetona [Model of the criterion of crack resistance and strength of plane-stressed structures made of high-strength fiber concrete and fiber concrete]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2021; 3 (95): 15–26. (in Russ.)

17. Zlepko A. Yu. Treshchinostojkost' fibrocementa armirovannogo stal'noj provolochnoj fibroj [Crack resistance of fiber cement reinforced with steel wire fiber]. *Molodoj uchenyj*. 2020; 6 (296): 57–61. (in Russ.)

18. Zercalov M. G., Hoteev E. A. Eksperimental'noe opredelenie karakteristik treshchinostojkosti fibrobetona [Experimental determination of fracture resistance characteristics of fibrobetone]. *Vestnik MGSU*. 2014; 5: 91–99. (in Russ.)

19. Korotkih D. N. Zakonomernosti razrusheniya struktury vysokoprochnykh cementnyh betonov na osnove analiza polnykh ravnovesnykh diagramm ih deformirovaniya (chast' 1) [Patterns of destruction of the structure of high-strength cement concretes based on the analysis of complete equilibrium diagrams of their deformation (part 1)]. *Vestnik VolgGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. Vyp. 26. 2012: 56–67. (in Russ.)

20. Korotkih D. N. Zakonomernosti razrusheniya struktury vysokoprochnykh cementnyh betonov na osnove analiza polnykh ravnovesnykh diagramm ih deformirovaniya (chast' 2) [Patterns of destruction of the structure of high-strength cement concretes based on the analysis of complete equilibrium diagrams of their deformation (part 2)]. *Vestnik VolgGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2012; 27: 54–62. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Пухаренко Ю. В. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач.

Пантелеев Д. А. Планирование эксперимента, изготовление контрольных образцов, подготовка текста публикации.

Жаворонков М. И. Проведение испытаний фибробетонных образцов, построение диаграмм деформирования и определение силовых и энергетических характеристик трещиностойкости, подготовка текста публикации.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Yury V. Pukharenko. Formation of research area, formulation of goals and objectives.

Dmitrii A. Panteleev. Planning of the experiment, production of control samples, preparing the text for the publication.

Mikhail I. Zhavoronkov. Testing of fiber-reinforced concrete specimens, plotting deformation diagrams and determining the force and energy characteristics of crack resistance, preparing the text for the publication.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пухаренко Юрий Владимирович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой ТСММ; гл. науч. сотр.

Пантелеев Дмитрий Андреевич – канд. техн. наук, доц.

Жаворонков Михаил Ильич – канд. техн. наук, доц.

AUTHORS' AFFILIATION

Yury V. Pukharensko – Dr. of Sci., Professor; head of the Technology of Building Materials and Metrology Department; Principal Researcher.

Dmitrii A. Panteleev – Cand. Sci., Associate Professor, Technology of Building Materials and Metrology Department, <https://orcid.org/0000-0002-6590-5033>, Scopus Author ID 57226886877, SPbGASU, dm-pant@yandex.ru.

Mikhail I. Zhavoronkov – Cand. of Sci., Associate Professor; Technology of Building Materials and Metrology Department.