



DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-2-182-192
 УДК 691.32

НАУЧНЫЙ ОБЗОР / REVIEW

Свойства дисперсных волокон для эффективного армирования бетонов

А.С. Маркович , Д.А. Милосердова  

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

 miloserdova-da@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 января 2022 г.

Доработана: 12 марта 2022 г.

Принята к публикации: 25 марта 2022 г.

Для цитирования

Маркович А.С., Милосердова Д.А. Свойства дисперсных волокон для эффективного армирования бетонов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 2. С. 182–192. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-182-192>

Аннотация. Вопрос повышения надежности и долговечности железобетонных конструкций считается приоритетным в современном строительстве. Одним из направлений повышения прочности бетонов является применение дисперсного армирования. За последние десять лет интерес к использованию дисперсно-армированных бетонов в России, а также в странах Европы, Азии и США существенно возрос. Отмечено, что улучшение физико-механических свойств бетона зависит от параметров армирования, таких как объемное содержания волокна, характеристик дисперсной арматуры, структуры бетонной матрицы и т. д. Рассматриваются различные виды волокон для дисперсного армирования бетонов, а именно полипропиленовое, полиэтиленовое, нейлоновое, акриловое, полиэфирное, хлопковое, асбестовое, стеклянное, базальтовое, стальное, углеродное. Дано описание основных достоинств и недостатков каждого из видов волокон. Приведены сравнительные характеристики по плотности, прочности на растяжение, модулю упругости, относительному удлинению при разрыве материалов, которые используются для изготовления волокна. Рассмотрено влияние волокон на трещиностойкость дисперсно-армированного бетона под воздействием ударных нагрузок. При аналитическом обзоре существующих исследований установлено, что можно добиться значительного повышения прочности бетона, армированного волокнами, на осевое сжатие, растяжение, растяжение при изгибе, срезе по сравнению с обычным тяжелым бетоном.

Ключевые слова: дисперсно-армированный бетон, волокно, прочность, бетонная матрица, объемный коэффициент армирования

Маркович Алексей Семенович, кандидат технических наук, доцент департамента строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-3967-2114, Scopus ID: 57209575592, WoS ID: AAK-4701-2021, eLIBRARY SPIN-код: 9203-1434; markovich-as@rudn.ru

Милосердова Дарья Александровна, ассистент, аспирант департамента строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-0835-528X, Scopus ID: 57212346981, WoS ID: AGN-7861-2022, eLIBRARY SPIN-код: 1276-6516; miloserdova-da@rudn.ru

© Маркович А.С., Милосердова Д.А., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Properties of dispersed fibers for efficient concrete reinforcement

Alexey S. Markovich , Darya A. Miloserdova  

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

✉ miloserdova-da@rudn.ru

Article history

Received: January 14, 2022

Revised: March 12, 2022

Accepted: March 25, 2022

For citation

Markovich A.S., Miloserdova D.A. Properties of dispersed fibers for efficient concrete reinforcement. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(2):182–192. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-182-192>

Abstract. The question of increasing the reliability and durability of reinforced concrete structures is a priority. One of the ways to increase the strength of concrete is using of dispersed reinforcement. The interest of using of fiber-reinforced concrete in Russia, as well as in Europe, Asia and the USA has increased significantly in recent ten years. The improvement of the physical and mechanical properties of concrete is noted to depend on the reinforcement parameters, such as the volume content of the fiber, the characteristics of the dispersed reinforcement, the structure of the concrete matrix, etc. Authors consider various types of fibers for dispersed concrete reinforcement, specifically polypropylene, polyethylene, nylon, acrylic, polyester, cotton, asbestos, glass, basalt, steel, carbon. Description of the main advantages and disadvantages of each type of fiber is given. Comparative characteristics are presented in terms of density, tensile strength, modulus of elasticity, elongation at fracture of the materials used to manufacture the fiber. The influence of fibers on crack strength of fiber-reinforced concrete under impact loads is studied. Analytical review of existing works found that it is possible to achieve a significant increase of strength of fiber-reinforced concrete in axial compression, tension, tension in bending, shear compared to ordinary heavy concrete.

Keywords: fiber-reinforced concrete, fiber, strength, concrete matrix, volumetric reinforcement ratio

Введение

Дисперсно-армированный бетон представляет собой композиционный материал, который в настоящее время широко используется в различных отраслях строительства. В качестве дисперсного армирования применяются различные волокна (фибры), которые равномерно рассредоточиваются в объеме бетонной матрицы. Наибольший интерес представляют композиты на основе доступных для производства минеральных матриц, дисперсно-упрочненных особыми волокнами (металлическими, стеклянными, базальтовыми, полиамидными, углеродными и т. д.).

Первые сведения о дисперсно-армированном бетоне появились в начале XX в. в работах В.П. Некрасова [1–3], который описал результаты исследований по получению бетонных материалов с дисперсным армированием проволокой малого диаметра. Итогом его исследований стала монография «Новый железобетон» (1925), в которой излагаются основы теории, экспериментальные результаты и сделан вывод о перспективности применения дисперсно-армированного бетона.

Данными вопросами интересовались и зарубежные ученые. Так, Гари Портер (1910) установил, что механические характеристики бетона возрастают до 8 раз при введении в его состав проволоки и гвоздей [4]. В 1914 г. был выдан патент У. Фиклину на вид бетона, получаемого путем добавления размельченных кусков железа рваной формы¹.

Alexey S. Markovich, PhD in Civil Engineering, Associate Professor of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3967-2114, Scopus ID: 57209575592, WoS ID: AAK-4701-2021, eLIBRARY SPIN-code: 9203-1434; markovich-as@rudn.ru

Darya A. Miloserdova, Assistant, PhD student of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0835-528X, Scopus ID: 57212346981, WoS ID: AGN-7861-2022, eLIBRARY SPIN-code: 1276-6516; miloserdova-da@rudn.ru

¹ British Patent No. 11754. Improvements in reinforced structures and wearing surfaces of hydraulics, bituminous, or like cement, concrete, asphalt, or the like / Ficklen W. 21 May 1914.

Затем интерес к исследованию бетона, армированного волокнами, угас до середины 1950-х гг. Известны лишь редкие факты применения такого вида бетона. Например, в 1930-х гг. для гидротехнического строительства использовался бетон, усиленный стальным волокном, как материал, стойкий к износу. Последующий период характеризовался интенсивными поисками новых видов волокон. В 1940-х гг. предпринимались попытки увеличить прочность бетона, введением в его состав джутового волокна.

В 1960-х гг. в связи с увеличением использования дисперсно-армированного бетона стали проводиться широкие экспериментальные исследования [5]. Для этой цели применялось стекловолокно из обычного стекла, которое, как показали опыты, разрушается в бетоне из-за недостаточной стойкости к щелочной среде. Позже начались исследования физико-механических свойств фибробетона со стальным волокном в Риге, Ленинграде, Челябинске. Постепенно накапливался опыт применения фибробетона в несущих конструкциях, о чем свидетельствуют работы советских и зарубежных исследователей. В то время ученых интересовали вопросы, связанные с увеличением сопротивления бетона растяжению и повышению вязкости разрушения за счет использования не только стальных, но и стеклянных, углеродистых, пластмассовых и других видов волокон. Вполне успешным оказался опыт применения волокон из полипропилена и капрона. Одновременно с этим было исследовано поведение натуральных волокон (хлопка, шерсти), оказавшихся малопригодными из-за низких значений модуля упругости армирующего материала [6].

Повышение доступности материалов, применяемых для получения армирующих волокон, привело к росту практического интереса к дисперсно-армированному бетону, а строительство ответственных пространственных конструкций и сооружений, в частности тонкостенных оболочек, стимулировало повышение требований к прочностным характеристикам бетона, в особенности к его сопротивлению растяжению.

За последние 10 лет существенно возрос интерес к использованию дисперсно-армированных бетонов как в России, так и в странах Европы, Азии и в США. Это связано с необходимостью получения для современного строительства бетонов с повышенными, по сравнению с обычными тяжелыми бетонами, физико-механическими характеристиками. Имеются многочисленные работы наших современников (Ф.Н. Рабинович, Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, И.У. Аубакирова, С.В. Клюев, А.В. Клюев, Р.В. Лесовик, Т.А. Низина и др.), посвященные вопросам, проблемам и технологии дисперсного армирования бетонов [7–14].

Виды армирующих волокон

Для получения высокопрочных дисперсно-армированных бетонов должны соблюдаться следующие условия: достаточное количество одинаковых высокопрочных волокон; хорошее сцепление волокон с раствором и бетоном; равномерное распределение волокон по всему объему матрицы; химически инертная матрица по отношению к волокнам; высокий модуль упругости волокна по сравнению с матрицей; стремление к ориентированному распределению волокон в матрице [15–19].

Наиболее эффективным в конструкционном отношении является армирование бетонных конструкций стальным волокном, модуль упругости которого примерно в 6 раз превышает модуль упругости бетона. Стеклянные волокна диаметром 8–10 мкм по прочности соответствуют высокоуглеродистой холодно-тянутой проволоке (1,8–2,5 ГПа), а по плотности в 3,5 раза легче. Модуль упругости стекловолокнистых материалов (70–80 ГПа) ниже, чем стали, но примерно в 3 раза превышает начальный модуль упругости бетона (30 ГПа). Данное обстоятельство обосновывает эффективность применения стеклянных волокон в качестве эффективного армирующего материала. Базальтовые волокна также обладают высокой прочностью на разрыв (1,6–3,6 ГПа), сопоставимой с прочностью высокопрочных стеклянных волокон, а их модуль упругости выше на 15–20 %, чем у волокон стекла.

Синтетические волокна на основе полипропилена характеризуются повышенной деформативностью (удлинение при разрыве 10–25 %). Модуль упругости синтетических волокон $E = 3,5–8,0$ ГПа, что составляет не более 0,25 модуля упругости обычного бетона. В связи с этим волокна из полипропилена не могут использоваться в качестве эффективного дисперсного армирования, но могут применяться при локальных ремонтных и восстановительных работах несущих конструкций.

В [20] предложено разделять волокна, используемые для дисперсного армирования бетонов, на два типа: низко модульные и высоко модульные. Высоко модульные волокна имеют модуль упругости при растяжении выше, чем армирующая ими матрица, а низко модульные – ниже. При армировании низко модульными волокнами в основном происходит повышение ударной вязкости бетона. Для второго типа волокон характерно увеличение прочности бетона на растяжение, повышение модуля упругости армированного бетона и его сопротивления динамическим воздействиям.

Исследования [20] показали, что для увеличения физико-механических характеристик бетонов могут быть использованы также и углеродистые волокна. Такие волокна имеют повышенную стойкость к коррозии и увеличивают прочность цементного камня на растяжение и его модуль упругости.

Основные физико-механические характеристики используемых для дисперсного армирования бетона волокон приведены в табл. 1 [7; 20–26].

Таблица 1

Физико-механические характеристики волокон для дисперсного армирования бетона

Тип волокна	Плотность, кг/м ³	Прочность на растяжение, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение при разрыве, %
<i>Низкомодульное волокно</i>				
1. Полипропиленовое	900	0,4–0,77	3,5–8	10–25
2. Полиэтиленовое	950	0,7	1,4–4,2	10
3. Нейлоновое	1100	0,77–0,84	4,2	16–20
4. Акриловое	1100	0,21–0,42	2,1	25–45
5. Полиэфирное	1400	0,73–0,78	8,4	11–13
6. Хлопковое	1500	0,42–0,7	4,9	3–10
<i>Высокомодульное волокно</i>				
7. Углеродное	2000	2,0	245	1
8. Асбестовое	2600	0,91–3,1	68–70	0,6
9. Стеклоанное	2600	1,05–3,85	70–80	1,5–3,5
10. Базальтовое	2600	1,6–3,6	80–110	1,4–3,6
11. Стальное	7800	0,80–3,15	200	3–4

Table 1

Physical and mechanical characteristics of fibers for dispersed concrete reinforcement

Type of fibers	Density, kg/m ³	Tensile strength, GPa	Modulus of lasticity, GPa	Elongation at fracture, %
<i>Low-modulus fiber</i>				
1. Polypropylene	900	0,4–0,77	3,5–8	10–25
2. Polyethylene	950	0,7	1,4–4,2	10
3. Nylon	1100	0,77–0,84	4,2	16–20
4. Acrylic	1100	0,21–0,42	2,1	25–45
5. Polyester	1400	0,73–0,78	8,4	11–13
6. Cotton	1500	0,42–0,7	4,9	3–10
<i>High-modulus fiber</i>				
7. Carbon	2000	2,0	245	1
8. Asbestos	2600	0,91–3,1	68–70	0,6
9. Glass	2600	1,05–3,85	70–80	1,5–3,5
10. Basalt	2600	1,6–3,6	80–110	1,4–3,6
11. Steel	7800	0,80–3,15	200	3–4

Однако не все из перечисленных волокон отвечают требованиям, которые предъявляются к материалу для дисперсного армирования. Для выбора армирующих волокон следует учитывать, прежде всего, такие критерии, как прочность, деформативность, химическая стойкость, адгезия к бетону, коэффициент линейного расширения и т. д.

Наибольший практический интерес для эффективного использования в строительстве представляет рассмотрение свойств образцов, полученных на основе стального, стеклянного и базальтового волокон, а также некоторых видов волокон органического происхождения.

Армирование бетонных конструкций волокнами может сочетаться с армированием обычными стальными или композитными стержнями, устанавливаемыми в наиболее напряженных частях конструкции. Волокна в бетоне могут быть распределены хаотично или ориентированы в соответствии с направлением действующих усилий. Совместная работа волокон с бетоном обеспечивается за счет сцепления по их поверхности.

При фибровом армировании существенную роль играет характер расположения волокон в объеме бетонной матрицы. Обычно их размещение по сечению носит хаотичный характер. Однако в ряде случаев формирование элемента оказывает влияние на расположение волокон. Так, при горизонтальном формировании элементов значительная часть волокон располагается непосредственно вдоль траектории напряжения, тогда как у вертикальных отформованных элементов волокна располагаются под прямым углом к направлениям напряжений и весьма мало способствуют повышению прочности конструкции при растяжении и изгибе.

Прочность сцепления между волокнами и бетонной матрицей имеет первостепенное значение для механических характеристик дисперсно-армированного бетона. При формировании необходимо тщательно осуществить уплотнение бетонной смеси с целью обеспечения надежного контакта между цементным тестом и поверхностью волокон. Особенно это важно для минеральных волокон, которые представляют собой пучки с множеством фибронитей. В этом случае целесообразно применять смеси с высокой подвижностью (осадка конуса не менее 10–15 см), чтобы цементное тесто со всех сторон обхватывало отдельные волокна.

Металлические волокна имеют с бетонной матрицей физико-механическую связь, только если на их поверхности есть неровности. Для повышения прочности сцепления с бетоном стальной проволоке придают определенный профиль, искривляют продольную ось или устраивают анкерные отгибы по концам. В некоторых случаях применяют химический способ обработки поверхности проволоки, придавая ей шероховатость. Величина сцепления с бетоном обработанной проволоки до 5 раз выше, чем необработанной [7]. Химического взаимодействия между материалами стальных волокон и бетонной матрицы не наблюдается, это характерно также для многих полимерных волокон, таких как полипропилен, нейлон и др.

Связь стеклянных волокон с бетонной матрицей отличается от аналогичной связи стальных волокон. Имеет место химическое взаимодействие первых с бетонной матрицей, также им присуще изменения на молекулярном уровне в процессе выдерживания бетона до достижения требуемой прочности. В бетоне стеклянные волокна обычно располагаются линзами или лентами разных размеров. Такая лента отличается неравномерной плотностью. В результате в ней кое-где остаются свободные, не заполненные цементным тестом пространства. Однако при дальнейшем твердении эти пространства заполняются кристаллическими новообразованиями (гидроокись кальция). На ранних стадиях твердения зона действительного контакта волокон с матрицей меньше геометрической площади поверхности волокон из-за дискретного характера образования структур гидросиликата кальция. Постепенно по мере гидратации цемента этот контакт возрастает. В качестве стеклянных армирующих волокон должно применяться щелочестойкое волокно, так как степень коррозии поверхности волокна в значительной степени влияет на потерю его прочности.

Базальтовое волокно, как и минеральное, также вступает в реакцию с продуктами гидратации цементной матрицы, но реакция протекает весьма ограничено. Интенсивность взаимодействия базальтового волокна с цементной матрицей имеет затухающий характер. Характер взаимодействия волокон с щелочным раствором обусловлен адсорбцией труднорастворимых гидросиликатов и гидроалюминатов кальция на поверхности волокон. Эти процессы приводят к увеличению размеров имеющихся поверхностных дефектов и появлению новых. Такие дефекты существенно снижают прочность волокон. В результате с течением времени происходит постепенное уменьшение диаметра волокна, что в конечном счете приводит к значительному снижению эффекта армирования бетонных матриц этими волокнами [27].

Существует несколько методов борьбы с разрушением волокон: использование полимербетона, малощелочных вяжущих, минеральных добавок, позволяющих уменьшить агрессивное воздействие среды, изменение структуры самих волокон (подшихтовка, термическая обработка, ионообменная обработка, обработка поверхности водными растворами солей и т. д.). Наиболее распространенным методом является введение кремнеземсодержащих материалов ввиду их повышенной активности к щелочной среде гидратирующего цемента [27; 28].

Для производства бетонов, армированных волокнами, важно обеспечить их равномерное распределение в объеме раствора. Равномерное распределение по всему объему матрицы в основном зависит от отношения длины волокон к диаметру, объемного коэффициента армирования (μ), размера частиц заполнителя, количества заполнителя, технологии добавления волокон в смесь, способов перемешивания (рисунок). Параметры дисперсного армирования должны препятствовать росту наиболее опасных трещин, которые возникают на уровне микроструктуры бетонной матрицы.

Сложность приготовления дисперсно-армированной смеси заключается в том, что волокна при смешивании сбиваются в комки, называемые «ежами» (рисунок). Такие «ежи» создают существенную неоднородность

родность смеси, затрудняют дальнейшие технологические операции и вследствие неравномерного распределения дисперсной арматуры в бетоне изменяют его физико-механические характеристики. Это наблюдается при использовании практически всех видов волокон, независимо от вида применяемого вяжущего. Может возникнуть ситуация, при которой содержание волокон и степень их распределения в бетонной матрице будут крайне неоднородными, что, скорее всего, в итоге приведет к стохастическому характеру прочностных критериев конструкции. В [29] указывается, что на распределение фибровой арматуры в бетоне влияют следующие факторы: последовательность операций при перемешивании; состав бетона; процентное содержание и жесткость армирующих волокон. Комья могут представлять собой не только переплетенные между собой волокна, но и включать в себя другие компоненты бетона (песок, цемент, крупный заполнитель). Для снижения комкования следует уменьшать время перемешивания смеси при наличии в ней армирующих волокон; равномерно вводить волокна в предварительно приготовленную смесь, не допуская их скапливания, постоянно удаляя их от места ввода. По сравнению с металлическими волокнами минеральные и синтетические волокна при перемешивании имеют несколько меньшую тенденцию к комкованию, поэтому перед введением их в бетонную смесь не требуется предварительное просеивание через сито.

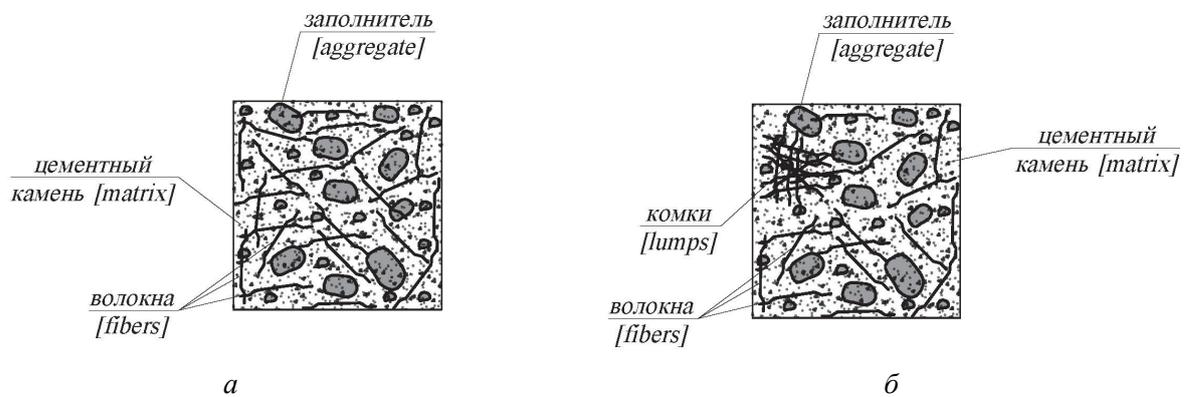


Схема дисперсно-армированного бетона:
 а – равномерное распределение волокон по объему матрицы;
 б – неравномерное распределение волокон по объему матрицы (образование комков)
 Structure of fiber-reinforced concrete:
 а – uniform distribution of fibers throughout the volume of the matrix;
 б – uneven distribution of fibers throughout the volume of the matrix (formation of lumps)

Влияние вида волокон на физико-механические характеристики армированных бетонов

Дисперсное армирование бетона при рабочем уровне объемного содержания волокон приводит к более равномерному перераспределению возникающих в бетоне усилий, блокирует развитие трещин, препятствует возникновению магистральных трещин. На основе испытаний плит при воздействии на них ударной нагрузки [30] установлено, что в дисперсно-армированных плитах максимальная ширина раскрытия трещин меньше, чем в аналогичной плитах из тяжелого бетона.

В дисперсно-армированной плите образуются короткие неорганизованные трещины, которые образуют очертание двойного кольца с лучами, но полностью не смыкаются. Ширина раскрытия трещин в такой плите после воздействия ударной нагрузкой достигла 0,15 мм. При аналогичном испытании железобетонной плиты образуется кольцевая трещина с лучами новых трещин. Ширина раскрытия трещины в железобетонной плите достигла 0,5 мм [30]. Характер разрушения плит приведен в табл. 2.

Чтобы оценить влияние стального и базальтового волокон как наиболее эффективных для дисперсного армирования произведен анализ существующих исследований [20; 31–45]. Рабочий диапазон объемного содержания стального волокна в дисперсно-армированном бетоне рекомендуется принимать в пределах от 1,0 до 1,5 %. Более высокий процент армирования не всегда является обоснованным, так как при этом повышается трудоемкость изготовления конструкции. Объемное содержание базальтовых волокон при хаотичном армировании бетона рекомендуется принимать в пределах от 3,0 до 5,0 %.

На основании экспериментальных исследований [31–45] составлены таблицы, в которых отражаются сведения об изменении прочности дисперсно-армированных бетонов по сравнению с обычными тяжелыми бетонами (табл. 3, 4).

Таблица 2

Схема появления трещин при воздействии ударной нагрузкой

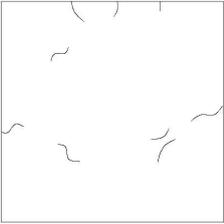
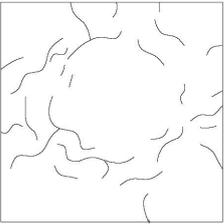
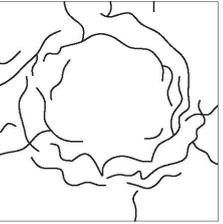
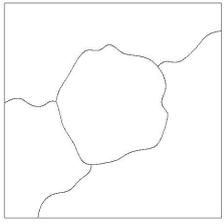
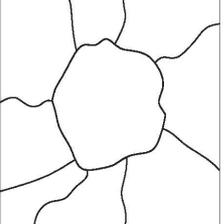
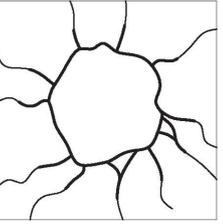
Вид элемента	Схема появления трещин			Характер разрушения
	На начальном этапе	В процессе	На последнем этапе	
Дисперсно-армированная плита				Короткие неорганизованные трещины, которые обрели очертание двойного кольца с лучами, но полностью не сомкнулись. Ширина раскрытия трещины достигла 0,15 мм
Железобетонная плита				Кольцевая трещина с лучами новых трещин. Ширина раскрытия трещины достигла 0,5 мм

Table 2

The scheme of the appearance of cracks under impact load

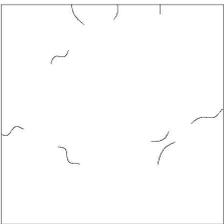
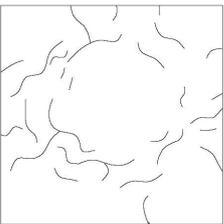
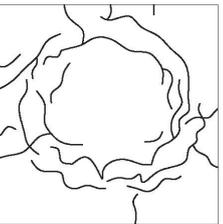
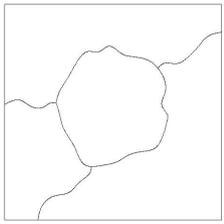
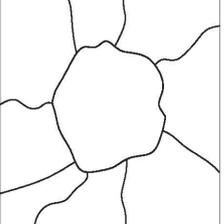
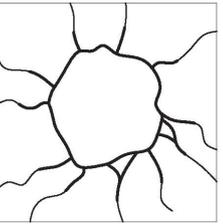
The type of element	The scheme of the appearance of cracks			The nature of the destruction
	At the initial stage	In progress	At the last stage	
Fiber-reinforced concrete slab				Short disorderly cracks, which take on the shape of a double ring with rays, but do not completely close. The crack opening width in such a slab after impact loading reached 0.15 mm
Reinforced-concrete slab				A circular crack is formed with rays of new cracks. The crack opening width in such slab reached 0.5 mm

Таблица 3

Влияние стального волокна на механические свойства тяжелых бетонов

Изменение прочности дисперсно-армированного бетона относительно обычного бетона при испытаниях на:			
изгиб (первая трещина), %	растяжение при изгибе, %	сжатие, %	срез, %
+50–60	+50–100	+10–50	+75

Table 3

Influence of steel fiber on the mechanical properties of heavy concrete

Change of the strength of fiber-reinforced concrete relative to ordinary concrete when tested for:			
bending (first crack), %	tension in bending, %	compression, %	shear fracture, %
+50–60	+50–100	+10–50	+75

Таблица 4

Влияние базальтового волокна на механические свойства тяжелых бетонов

Изменение прочности дисперсно-армированного бетона относительно обычного бетона при испытании на:			
растяжение (осевое), %	прочность при изгибе (растяжение при изгибе), %	сжатие, %	срез, %
+55	+30–85	+7,5–40	+25–40

Table 4

Influence of basalt fiber on the mechanical properties of heavy concrete

Change of the strength of fiber-reinforced concrete relative to ordinary concrete when tested for:			
tension (axial), %	flexural strength, %	compression, %	shear fracture, %
+55	+30–85	+7.5–40	+25–40

Установлено, что увеличение процентного содержания стального волокна более чем на 2,5 % существенно не повышает прочность бетона на сжатие, а в отдельных случаях, напротив, снижает ее [31–45]. Увеличение процента дисперсного армирования бетона базальтовым волокном свыше 6,0 % приводит к комкованию смеси, что влечет снижение прочности в среднем на 15–20 %.

Заключение

Добавление дисперсных волокон в состав бетонной смеси позволяет значительно повысить прочностные и деформационные свойства бетона. Большое значение имеют материал, структура и геометрия дисперсных волокон, объемное их содержание в бетонной смеси.

Установлено, что для эффективного дисперсного армирования бетонных и железобетонных конструкций наибольший интерес представляют фибры, полученные на основе стального и базальтового волокон.

Перспективной областью исследования дисперсно-армированных бетонов является изучение различных комбинаций из волокон разных видов, наполнителя, разнообразных добавок для достижения наилучших прочностных показателей, трещиностойкости, усадки и т. д.

Список литературы

1. Некрасов В.П. Новейшие приемы и задачи железобетонной техники. СПб.: Электронпечатня К. Четверикова, 1909. 86 с.
2. Некрасов В.П. Новейшие приемы и задачи железобетонной техники: система свободных связей // Цемент, его производные и применение: XII Съезд русских цементных техников. СПб., 1909. С. 294–348.
3. Некрасов В.П. Метод косвенного вооружения бетона. М., Транспечать, 1925.
4. Porter H.F. Preparation of concrete from selection of materials to final disposition // Proceedings of the National Association of Cement Users. 1910. Vol. 6. P. 191.
5. Бирюкович К.Л., Бирюкович Ю.Л., Бирюкович Ю.Д. Цементный раствор, армированный волокном. Киев: Будивельник, 1964.
6. De Vekey R.C., Majumdar A.J. Determining bond strength in fibre reinforced composites concrete // Research. 1968. Vol. 20. No 65. P. 322.
7. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Издательство АСВ, 2011.
8. Пухаренко Ю.В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2004.
9. Пантелеев Д.А. Полиармированные фибробетоны с использованием аморфнометаллической фибры: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016.
10. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Никитин В.А., Староверов В.Д. Структура и свойства наномодифицированных цементных систем // Наука и инновации в строительстве – SIB2008: современные проблемы строительного материаловедения и технологии: в 5 т. Т. 1. Кн. 2. Воронеж, 2008. С. 424–429.
11. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Скобликов В.А., Летенко Д.Г., Никитин В.А., Чарыков Н.А. Применение наносистем при получении сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров, 2011. № 3 (28). С. 77–81.

12. Ключев С.В., Лесовик Р.В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон с использованием полипропиленового волокна // Бетон и железобетон. 2011. № 3. С. 7–9.
13. Ключев А.В. Сталефибробетон для сборно-монолитного строительства // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2011. № 2. С. 60–63.
14. Низина Т.А., Балыков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2 (62). С. 13–26.
15. Волков И.В., Газин Э.М. Фибровая арматура для бетонов // Труды 1-й Всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона. М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. С. 1171–1179.
16. Курбатов Л.Г., Рабинович Ф.Н. Об эффективности бетонов, армированных стальными фибрами // Бетон и железобетон. 1980. № 3. С. 6–7.
17. Махова М.Ф. Базальтоволокнистые материалы // Обзор ВНИИЭСМ. М., 1989.
18. Фибробетон и его применение в строительстве / под ред. Б.А. Крылова, К.М. Королева. М.: НИИЖБ, 1979.
19. Fibre reinforced cement and concrete: proceedings of the RILEM International Symposium / ed. by R.N. Swamy. London, 1975.
20. Рабинович Ф.Н. Бетоны, дисперсно армированные волокнами // Обзор ВНИИЭСМ. М., 1976.
21. Бучкин А.В. Мелкозернистый бетон высокой коррозионной стойкости, армированный тонким базальтовым волокном: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011.
22. Войлоков И.А., Канаев С.Ф. Базальтофибробетон. Исторический экскурс // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 4. С. 26–31.
23. Войлоков И.А. Фибробетон история вопроса, нормативная база, проблемы и решения // Alitinform: цемент, бетон, сухие смеси. 2009. № 2. С. 44–53.
24. Маилян Р.Л. Рекомендации по проектированию железобетонных конструкций из керамзитобетона с фибровым армированием базальтовым волокном. Ростов н/Д: СевкавНИПИАгропром, Рост. гос. строит. ун-т, 1996.
25. Рабинович Ф.Н. Прогнозирование изменений во времени прочности стеклофиброцементных композитов // Стекло и керамика. 2003. № 2. С. 32–38.
26. Рабинович Ф.Н., Зуева В.Н., Макеева Л.В. Устойчивость базальтовых волокон в среде гидратирующихся цементов // Стекло и керамика. 2001. № 12. С. 29–32.
27. Сарайкина К.А., Голубев Е.Н., Семкова Е.Н. Щелочестойкость базальтового волокна и способы ее повышения // Вестник ПНИПУ. 2012. № 1. С. 185–192.
28. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Розина В.Е., Буянтуев С.Л., Бардаханов С.П. Повышение коррозионной стойкости базальтофиброцементных композиций с нанокремнеземом // Нанотехнологии в строительстве. 2014. Т. 6. № 4. С. 15–29.
29. Sather W.R. Fibrous concrete field batching sequences // ACI Journal. 1974. No 10. Pp. 504–505.
30. Рабинович Ф.Н. Особенности разрушения плит из фибробетона при ударных нагрузках // Бетон и железобетон. 1980. № 6. С. 9–10.
31. Талантова К.В., Михеев Н.М. Исследование влияния свойств стальных фибр на эксплуатационные характеристики сталефибробетонных конструкций // Ползуновский вестник. 2011. № 1. С. 194–198.
32. Аболинш Д.С., Кравинскис В.К. Дисперсно хаотически армированный бетон как двухфазный материал и некоторые экспериментальные данные о его прочности при центральном сжатии и изгибе // Исследования по механике строительных материалов и конструкций. 1969. № 4. С. 117–123.
33. Косарев В.М. Экспериментально теоретические исследования прочности и деформативности изгибаемых и центрально сжатых элементов сталефибробетонных конструкций при кратковременном воздействии нагрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1980.
34. Александров В.Н., Тетерин Ю.И., Гуков С.Е. Стальная фибра типа «Волан» для сталефибробетонных конструкций подземных сооружений // Подземное пространство мира. 1995. № 1. С. 42–44.
35. Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Горбунов И.А. Влияние характеристик фибры на кубиковую и призмную прочность сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей // Бетон и железобетон. 2013. № 6. С. 6–9.
36. Соловьев Б.В., Зива А.Г., Анисимов В.Е. Плиты дорожных и аэродромных покрытий с фибровым армированием // Применение фибробетона в строительстве / под ред. Л.Г. Курбатова. Л.: ЛДНТП, 1985. С. 73–78.
37. Косарев В.М. О структурном упрочнении бетона с помощью дисперсного фибрового армирования // Исследование и расчет экспериментальных конструкций из фибробетона: сборник научных трудов. Л.: Отд. обобщения отеч. и зарубеж. опыта и НТИ ЛенЗНИИЭПа, 1978. С. 70–75.
38. Розина В.Е. Мелкозернистый базальтофибробетон с нанокремнеземом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Улан-Удэ, 2015.
39. Abdulhadi M. A comparative study of basalt and polypropylene fibers reinforced concrete on compressive and tensile behavior // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2014. Vol. 9. Pp. 295–300.
40. Боровских И.В. Высокочерный тонкозернистый базальтофибробетон: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2009.

41. Jin S., Zhang X., Zhang J., Shen X. Experimental study on anti-splitting tensile properties of the chopped basalt fiber reinforced concrete // International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development (IFEESD 2016), Shenzhen, 16–17 April 2016. Shenzhen, 2016. Pp. 282–289.
42. Kizilkanat A.B. Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: an experimental study // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 100. Pp. 218–224.
43. Перфилов В.А., Зубова М.О. Влияние базальтовых волокон на прочность мелкозернистых бетонов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия: Политематическая. 2015. Вып. 1 (37). С. 1–4.
44. Зубова М.О. Мелкозернистые бетоны с применением базальтовой фибры и комплексных модифицирующих добавок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2014.
45. Журавская И.В. Прочность и деформативность базальтофибробетонных и комбинированно армированных элементов при действии малоциклового нагружения: дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1991.

References

1. Nekrasov V.P. *The latest techniques and tasks of reinforced concrete technology*. St. Petersburg: Elektropechatnya K. Chetverikova; 1909. (In Russ.)
2. Nekrasov V.P. The latest methods and tasks of reinforced concrete technology: a system of free bonds. *Cement, Its Derivatives and Application: XII Congress of Russian Cement Technicians*. Saint Petersburg, 1909. p. 294–348. (In Russ.)
3. Nekrasov V.P. *Concrete indirect arming method*. Moscow: Transpechat' Publ.; 1925. (In Russ.)
4. Porter H.F. Preparation of concrete from selection of materials to final disposition. *Proceedings of the National Association of Cement Users*. 1910;(6):191.
5. Biryukovich K.L., Biryukovich Yu.L., Biryukovich Yu.D. *Cement mortar reinforced with fiber*. Kiev: Budivel'nik Publ.; 1964. (In Russ.)
6. De Vekey R.C., Majumdar A.J. Determining bond strength in fibre reinforced composites concrete. *Research*. 1968;20(65):322.
7. Rabinovich F.N. *Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, constructions*. Moscow: ASV Publishing; 2011. (In Russ.)
8. Pukhareno Yu.V. *Scientific and practical foundations for the formation of the structure and properties of fiber-reinforced concrete* (dissertation abstract). Saint Petersburg; 2004. (In Russ.)
9. Pantelev D.A. *Polyreinforced fiber concretes using amorphous metal fibers* (dissertation abstract). Saint Petersburg; 2016. (In Russ.)
10. Pukhareno Yu.V., Aubakirova I.U., Nikitin V.A., Staroverov V.D. Structure and properties of nanomodified cement systems. *Science and Innovation in Construction – SIB2008: Modern Problems of Construction Materials Science and Technology* (vol. 1, book 2). Voronezh; 2008. p. 424–429. (In Russ.)
11. Pukhareno Yu.V., Aubakirova I.U., Skoblikov V.A., Letenko D.G., Nikitin V.A., Charykov N.A. Application of nanosystems in the steel fibrous concrete production. *Bulletin of Civil Engineers*. 2011;(3(28)):77–81. (In Russ.)
12. Kluev S.V., Lesovik R.V. Dispersion-reinforced fine-grained concrete using polypropylene fiber. *Beton i Zhelezobeton*. 2011;(3):7–9. (In Russ.)
13. Kluev A.V. Steel fiber reinforced concrete for prefabricated monolithic construction. *Vestnik BGTU imeni V.G. Shuhova*. 2011;(2):60–63. (In Russ.)
14. Nizina T.A., Balukov A.S. Experimental-statistical models of properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes. *Magazine of Civil Engineering*. 2016;(2(62)):13–26.
15. Volkov I.V., Gazin E.M. Fiber reinforcement for concrete. *Proceedings of the 1st All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete*. Moscow: Association “Zhelezobeton;” 2011. p. 1171–1179. (In Russ.)
16. Kurbatov L.G., Rabinovich F.N. About the efficiency of concrete reinforced with steel fibers. *Beton i Zhelezobeton*. 1980;(3):6–7. (In Russ.)
17. Makhova M.F. Basalt fiber materials. *Obzor VNIIESM*. Moscow; 1989. (In Russ.)
18. Krylov B.A., Korolev K.M. (eds.) *Fiber concrete and its application in construction*. Moscow: NIIZhB Publ.; 1979. (In Russ.)
19. Swamy R.N. (ed.) *Fibre Reinforced Cement and Concrete: Proceedings of the RILEM International Symposium*. London; 1975.
20. Rabinovich F.N. Concrete dispersed fiber reinforced. *Obzor VNIIESM*. Moscow; 1976. (In Russ.)
21. Buchkin A.V. *Fine-grained concrete of high corrosion resistance, reinforced with fine basalt fiber* (dissertation abstract). Moscow; 2011. (In Russ.)
22. Vojlokov I.A., Kanaev S.F. Basalt fiber reinforced concrete. Historical digression. *Inzhenerno-Stroitel'nyy Zhurnal*. 2009;(4):26–31. (In Russ.)
23. Voilokov I.A. Fibre-reinforced concrete – background. Normative base, problems and solutions. *Alitinform: Cement, Concrete, Dry Mixes*. 2009;(2):44–53. (In Russ.)

24. Mailyan R.L. *Recommendations for the design of reinforced concrete structures made of expanded clay concrete with fiber reinforcement with basalt fiber*. Rostov-on-Don: SevkavNIPIagroprom Publ.; 1996. (In Russ.)
25. Rabinovich F.N. Prediction of time changes in the strength of glass fiber cement composites. *Steklo i Keramika*. 2003;(2):32–38. (In Russ.)
26. Rabinovich F.N., Zueva V.N., Makeeva L.V. Stability of basalt fibers in the environment of hydrated cements. *Steklo i Keramika*. 2001;(12):29–32. (In Russ.)
27. Saraikina K.A., Golubev V.A., Semkova E.N. Basalt fiber alkali-resistance and methods of its increase. *Vestnik PNIPU*. 2012;(1):185–192. (In Russ.)
28. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Rozina V.Y., Buyantuev S.L., Bardakhanov S.P. Increased corrosion resistance of basalt reinforced cement compositions with nanosilica. *Nanotekhnologii v Stroitel'stve*. 2014;6(4):15–29. (In Russ.)
29. Willam R.S. Fibrous concrete field batching sequences. *ACI Journal*. 1974;(10):504–505.
30. Rabinovich F.N. Features of the destruction of fiber-reinforced concrete slabs under impact loads. *Beton i Zhelezobeton*. 1980;(6):9–10. (In Russ.)
31. Talantova K.V., Miheev N.M. Investigation of the influence of the properties of steel fibers on the performance characteristics of steel-fiber-reinforced concrete structures. *Polzunovskij Vestnik*. 2011;(1):194–198. (In Russ.)
32. Abolinsh D.S., Kravinskis V.K. Dispersed randomly reinforced concrete as a two-phase material and some experimental data on its strength under central compression and bending. *Issledovaniya po Mekhanike Stroitel'nyh Materialov i Konstrukcij*. 1969;(4):117–123. (In Russ.)
33. Kosarev V.M. *Experimental theoretical studies of the strength and deformability of bending and centrally compressed elements of steel-fiber-concrete structures under short-term load* (dissertation abstract). Leningrad; 1980. (In Russ.)
34. Alexandrov V.N., Teterin Yu.I., Gukov S.E. Steel fiber type “Volan” for steel-fiber-reinforced concrete structures of underground structures. *Podzemnoe Prostranstvo Mira*. 1995;(1):42–44. (In Russ.)
35. Dorf V.A., Krasnovskii R.O., Kapustin D.E., Gorbunov I.A. Influence of fiber characteristics on cubic and prism strength of steel fiber reinforced concrete with cement-sand matrix. *Beton i Zhelezobeton*. 2013;(6):6–9. (In Russ.)
36. Solovyov B.V., Ziva A.G., Anisimov V.E. *Fiber-reinforced road and airfield pavement slabs*. In: Kurbatov L.G. (ed.) *The Use of Fiber-Reinforced Concrete in Construction*. Leningrad: LDNTP Publ.; 1985. p. 73–78. (In Russ.)
37. Kosarev V.M. *On the structural strengthening of concrete using dispersed fiber reinforcement*. In: *Research and Calculation of Experimental Structures from Fiber-Reinforced Concrete: Collection of Scientific Papers*. Leningrad: Otd. obobshcheniya otech. i zarubezh. opyta i NTI LenZNIIEPa Publ.; 1978. p. 70–75. (In Russ.)
38. Rozina V.E. *Fine-grained basalt fiber-reinforced concrete with nanosilica* (dissertation abstract). Ulan-Ude; 2015. (In Russ.)
39. Abdulhadi M.A. Comparative study of basalt and polypropylene fibers reinforced concrete on compressive and tensile behavior. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2014;(9):295–300.
40. Borovskikh I.V. *High-strength fine-grained basalt fiber-reinforced concrete* (dissertation abstract). Kazan; 2009. (In Russ.)
41. Jin S., Zhang X., Zhang J., Shen X. Experimental study on anti-splitting tensile properties of the chopped basalt fiber reinforced concrete. *International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development (IFEESD 2016), Shenzhen, 16–17 April 2016*. Shenzhen; 2016. p. 282–289.
42. Kizilkanat A.B. Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: an experimental study. *Construction and Building Materials*. 2015;100:218–224.
43. Perfilov V.A., Zubova M.O. The influence of basalt fibers on strength of fine-grained fibrous concrete. *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2015;(1(37)):1–4. (In Russ.)
44. Zubova M.O. *Fine-grained concretes with the use of basalt fiber and complex modifying additives* (dissertation abstract). Volgograd; 2014. (In Russ.)
45. Zhuravskaya I.V. *Strength and deformability of basalt fiber-reinforced concrete and combined reinforced elements under low-cycle load* (dissertation abstract). Kiev; 1991. (In Russ.)