

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-8-21

Соловьев В.Г., *Сизяков И.Д., Веселов В.К.

Национальный исследовательский Московский государственный университет

*E-mail: sid89152578878@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ФИБРОБЕТОНА ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ СТЕКЛОКОМПОЗИТНОГО ВОЛОКНА

Аннотация. Исследование направлено на изучение новых видов армирующих элементов в бетоне – стеклокомпозитной фибры, как альтернативы стали и стержневому армированию. Актуальность вызвана необходимостью снижения материалоемкости и веса конструкций. Сложность заключается в слабо предсказуемом взаимодействии волокна с бетонной матрицей из-за его анизотропии и нестандартной геометрии.

В работе описаны основные методы испытаний для оценки качества сцепления стеклокомпозитного волокна с бетоном, обозначены основные нормативные документы, по которым проводились испытания. Объектом исследования является тяжелый фибробетон на основе стеклокомпозитного волокна: прямая с навивкой 4 мм и 10 мм, а также волновая с шагом периодического профиля 8 мм.

По результатам испытаний представлены зависимости прочности сцепления фибры от прочности бетонной матрицы. Зависимость имеет экспоненциальный возрастающий экспоненциально характер с помощью, которого можно отследить эффективную область применения стеклокомпозитной фибры в бетоне. Определено, что для матрицы бетона от 30 до 50 МПа является оптимальной с точки зрения сцепления со стеклокомпозитной фиброй. Сцепление волокна с шагом навивки 4 мм с бетонной матрицей достигает 20 МПа. Впоследствии были проведены испытания на определение трещиностойкости фибробетона с различными конфигурациями волокон, где выявлены оптимальные концентрации фибры, её форма. Волокно с навивкой 4 мм показало высокий результат, так удельные энергозатраты на раскрытие магистральной трещины составляют 5139,6 Дж/м², а коэффициент интенсивности напряжений равен 1,26. Результаты испытаний на трещиностойкость и вырыв из бетона позволили выявить оптимальную геометрическую форму фибры. Полученные результаты подтверждают возможность использования стеклокомпозитной фибры взамен стальной, для определённых областей применения, где значимым являются особенности более легкого коррозионностойкого волокна. Работа экспериментально доказывает, что прочность сцепления связана с геометрией стеклокомпозитного волокна.

Ключевые слова: фибробетон, стеклокомпозитная фибра, композит, трещиностойкость, сцепление фибры, волокно, выдергивание фибры.

Введение. Недостатком железобетонных изделий и конструкций является высокая трудоемкость производства работ, где большую часть занимает изготовление арматурного каркаса установка его в проектное положение. Стержневое армирование подразумевает неравномерное распределение усилий в бетоне [1], таким образом высокие растягивающие напряжения испытывает лишь некоторая зона около арматуры.

Для снижения трудозатрат и материалоемкости строительства применяют стеклокомпозитные арматурные стержни, которые показывают положительные результаты по сцеплению с бетоном сопоставимые со стальными стержнями периодического профиля [2, 3].

Помимо стержневого армирования существует альтернатива в качестве дисперсного армирования, что также компенсирует низкую прочность на осевое растяжение и на растяжение при изгибе, которое в зависимости от класса бетона имеет около 2–14 % от прочности на сжатие.

[4, 5]. Среди известных армирующих материалов стальная фибра показала наибольшую эффективность в улучшении физико-механических характеристик бетона, сопоставимую с арматурой. Остальные виды волокон – стеклянные, базальтовые, полимерные и углеродные [6] – используются реже из-за ограничений в области применения или технологии при производстве смесей. Композитные волокна на полимерном вяжущем имеют недостаточную величину сцепления с бетоном [7], стеклянные и базальтовые волокна – деградируют в щелочной среде цемента [8].

Анализ ряда литературных источников [13–24] позволил обобщить и систематизировать данные по влиянию на прочностные характеристики в зависимости от типа и вида дисперсного армирования. По удельным прочностным показателям на 1 % фибры по объему материала выявлено, что на прочность на растяжение при изгибе для композита на основе базальта на 82 % превышает прочность материала на изгиб для рядовых

тяжелых бетонов. Если же смотреть на композиты, изготовленные с использованием композитной стеклянной фибры, то напротив наблюдается незначительное изменения прочностных характеристик, что говорит о неоднозначности научных данных для этого класса материалов, требующее более подробного рассмотрения причин возникновения подобных результатов.

Для эффективной работы армирования необходимо выполнение требований к материалу: модуль упругости волокна много выше модуля упругости бетонной матрицы ($E_f \gg E_b$), что соблюдается для стальных армирующих элемен-

тов [9, 10]. На рисунке 1 хорошо видно, что в случае, где $E_f \ll E_b$ т. е. для низко модульной фибры наблюдается снижение прочностных характеристик дисперсно-армированного материала. В случае если $E_f \cong E_b$, что соблюдается для композитной фибры, имеющей сложную геометрическую форму, по результатам предварительных испытаний [11, 12] были выявлены высокие показатели сцепления с бетоном. Фибробетоны на основе стеклокомпозитной фибры способны конкурировать со сталефибробетонами с точки зрения физико-механических характеристик и экономической эффективности.

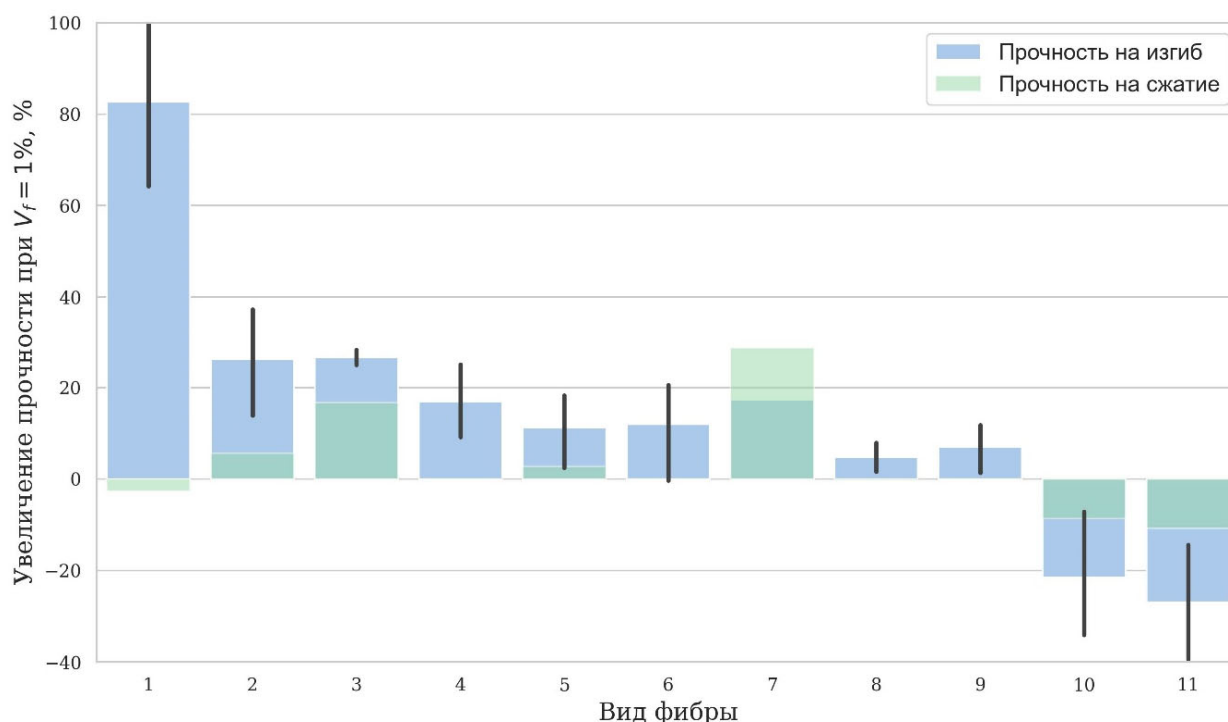


Рис. 1. Удельные показатели прироста прочностей бетонов для различных видов волокна на 1% фибры по объему:

1 – композитная базальтовая фибра [13]; 2 – стальная фибра анкерная [14–16]; 3 – стальная фибра гофрированная [17]; 4 – стальная со сплюснутыми концами [18]; 5 – стальная волновая [19]; 6 – арамидная [20]; 7 – углеродное волокно [21]; 8 – композитная стеклянная фибра [22]; 9 – полимерная ПВА фибра [23]; 10 – полипропиленовая фибра периодического профиля; 11 – полипропиленовая фибра с перекрестной навивкой [24]

Преимущества стеклокомпозитной фибры по сравнению со стальной заключаются в её низкой плотности, коррозионной стойкости, а также в высокой вариативности геометрических форм. Если в массовом строительстве нашли применение лишь несколько типов стальной фибры (прямая, анкерная, волновая), то стеклокомпозитные волокна, благодаря особенностям технологии их производства (в частности, пултрузии), потенциально могут иметь значительно большее разно-

образие форм (рис. 2). Это открывает возможности для целенаправленного подбора геометрии фибры под заданные условия работы бетона.

Для стальной фибры ранее было установлено оптимальное соотношение длины к диаметру в пределах $50 \leq \frac{l_f}{d_f} \leq 100$ [25]. В настоящем исследовании линейные параметры стеклокомпозитной фибры не рассматриваются, поэтому принято постоянное соотношение $\frac{l_f}{d_f} \approx 50$.

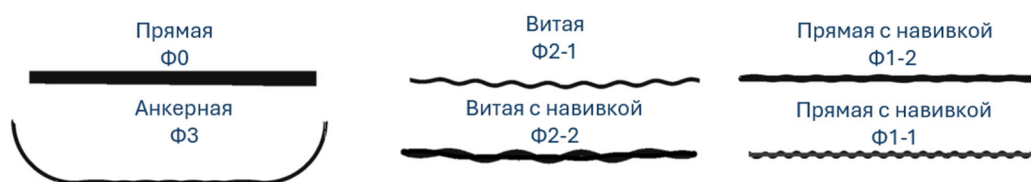


Рис. 2. Варианты конфигураций стеклокомпозитного волокна

Одним из ключевых параметров, характеризующих эффективность армирования бетона дисперсной фиброй, является прочность сцепления волокна с цементной матрицей. Теоретические основы сцепления для стальных волокон разной формы были заложены Ф. Н. Рабиновичем: показано, что у анкерных волокон большая часть напряжений сосредоточена в области загибов. В случае стеклокомпозитных фибр, производимых методом пултрузии, профиль может иметь периодическую форму, что усложняет расчёт распределения напряжений и требует введения поправочных коэффициентов. Аналогичная ситуация наблюдается в случае арматуры периодического профиля: разработанная М.М. Холмянским теория сцепления [26], которая требует адаптации при переходе к фибрам с небольшим диаметром волокна, сопоставимыми с ним.

Процесс вытягивания волокна из бетонной матрицы зависит от совокупности факторов: механического зацепления, химической адгезии и сил трения [27]. В зависимости от соотношения этих компонент при выдергивании может происходить разрушение как в теле волокна, так и в

окружающем бетоне. Максимальные касательные напряжения соответствуют моменту нарушения контактной зоны по достижению предельного состояния по одному из вышеприведенных сценариев, а характер кривой нагрузки зависит от механизма разрушения.

Таким образом, целью настоящей работы является выявление факторов, определяющих высокую прочность сцепления фибры с бетоном. Основная гипотеза заключается в том, что увеличение сцепления достигается за счёт усложнения геометрии волокна.

Материалы и методы. В исследовании использовались следующие материалы: цемент ЦЕМ II 42,5Н Аккерман, песок кварцевый с модулем крупности 2,7, щебень гранитный Карелия фракции 3–10 мм, пластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров Sika VC-5-600 SP.

Для испытаний использовались составы бетона, указанные в таблице 1. Маркировка бетона и состоит из 2-х частей из вида бетона и водоцементного соотношения.

Таблица 1

Составы мелкозернистого и тяжелого бетона для проведения испытаний

№	Маркировка	Цемент, кг	Вода, л	Песок, кг	Щебень, кг	Пластификатор, %	Фибра, кг
1	МЗБ*-0,56	540	305	1140	-	0,1%	-
2	МЗБ-0,45	569	256	1485	-	0,5%	-
3	МЗБ-0,37	596	221	1556	-	0,8%	-
4	МЗБ-0,30	622	187	1624	-	1,9%	-
5	МЗБ-0,25	1052	262	1052	-	1,9%	-
6-7-8	ФСКБ**-0,55	330	180	862	1169	0,5%	20-30-40
9-10-12	ФСКБ-0,47	338	159	883	1197,5	1,6%	20-30-40
13-14-15	ФСКБ-0,63	321	203	840	1139	0,5%	20-30-40

* – мелкозернистый бетон

** – тяжелый фибробетон со стеклокомпозитной фиброй

По результатам предыдущих [11,12] испытаний и анализа литературных источников были

подобраны эффективные конфигурации волокон Ф1-1, Ф1-2 и Ф2-2, изображенные на рисунке 3.

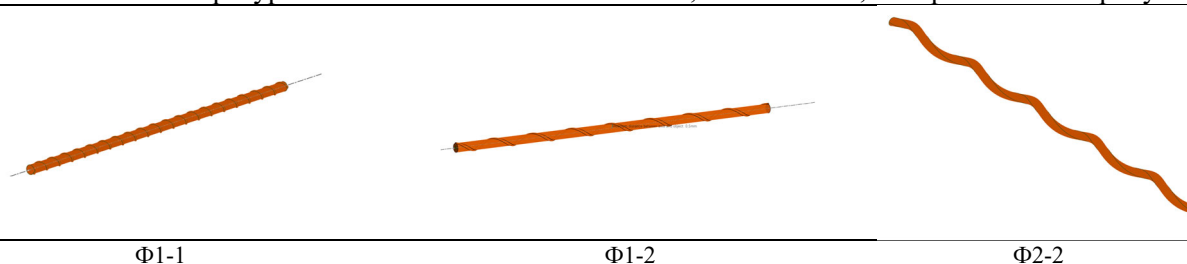


Рис. 3. Конфигурации волокон для проведения испытаний

В таблице 2 представлены основные характеристики, определенные для каждого волокна.

Таблица 2

Основные характеристики волокна

№	Тип фибры	Длина, мм	Диаметр, мм	Периодичность, мм	Плотность, г/см ³	Прочность на осевое растяже- ние, МПа	Площадь поверхности фибры, мм ²
1	Ф1-1	52,5	1,03	3,88	2,41	1269	171,5
2	Ф1-2	50,0	1,09	10,62	2,22	1154	166,0
4	Ф2-2	50,0	1,01	7,58	2,18	915	162,5

Для выявления закономерностей работы фибры с бетоном проводились следующие испытания: выдергивания фибры из бетона, определе-

ние остаточной прочности фибробетона на растяжение, а также определение прочности на сжатие контрольных образцов бетона.

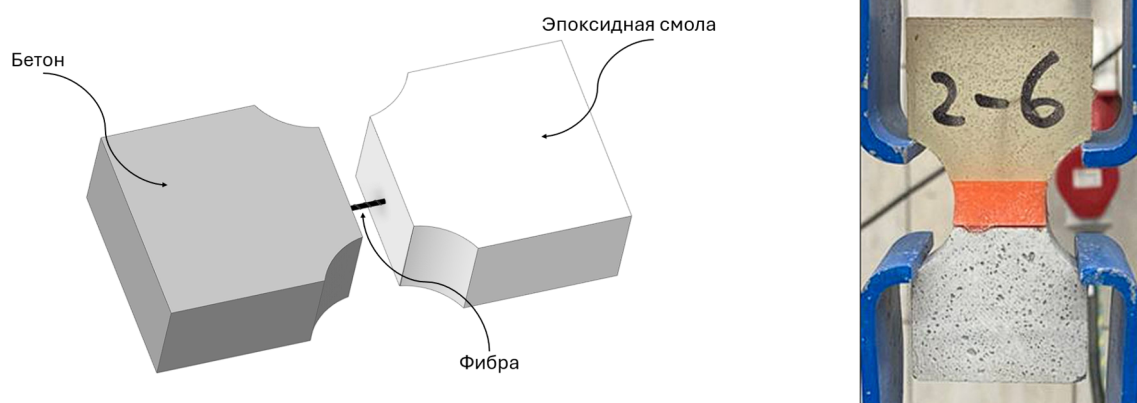


Рис. 4. Схема испытания образца при определении сцепления с волокном

Прочность сцепления фибры с бетоном определялась по методике схожей с вырывом арматуры из бетона, описанной в ГОСТ 31938–2012 (Приложение Д), которая была скорректирована для получения более точных значений исходя из наиболее низких показателей нагрузки для разрушения 1-ой фибры, для чего требуется более чувствительное оборудование, а также модернизирована подготовка образца для испытания. Схема представлена на рисунке 4. Для испытания изготавливаются образцы в форме 8-ки: одна часть состоит из полимербетона с составом 1:0,5:1,2 (смола: отвердитель: наполнитель), а другая часть из бетона (составы представлены в таблице 1), контакт с которым исследуется совместно со стеклокомпозитной фиброй. В обе половинки с разных сторон заделана стеклокомпозитная фибра на 30 и 10 мм – рисунок 5. Похожие испытания проводят и для определения прочности сцепления стальной фибры с бетоном [27].

Данные полученные по вытягиванию фибры из бетона сопоставлялись с данными по трещиностойкости фибробетонных образцов. Трещиностойкость определялась по остаточной прочности на растяжение бетонного образца по методике, описанной в СП 297.1325800.2017 (Приложение Б). Для сравнительных испытаний использовались образцы балки 100×100×400 мм, разрез в центре нижней части балки доходит глубиной 17 мм, расстояние между опорами $L = 360$ мм, в остальном испытание проведено по методике

нормативного документа. Схема испытания показана на рисунке 6.

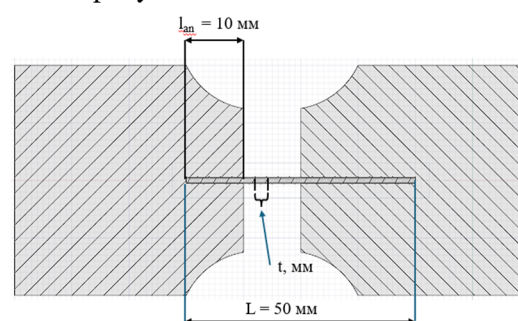


Рис. 5. Схема образца для определения прочности сцепления волокна с бетоном

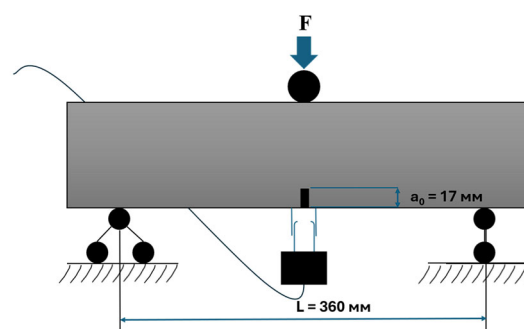


Рис. 6. Схема испытания по определению остаточной прочности на растяжение фибробетона

Для оценки влияния концентрации стеклокомпозитного волокна на свойства фибробетона определялись следующие характеристики: мак-

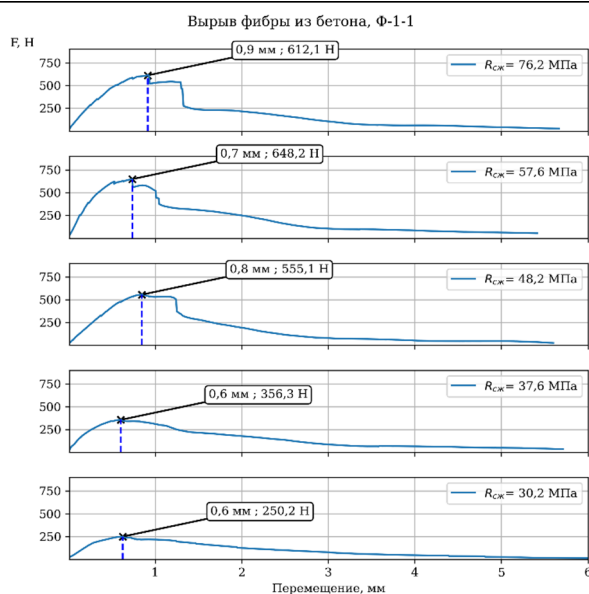
симальные напряжения, возникающие в фибробетонной балке; ширина раскрытия трещины при максимальном напряжении, значение напряжения при раскрытии трещины 2,5 мм; энергия разрушения необходимая для раскрытия трещины фибробетона 4 мм, что составляет примерно 0,01 от пролета изделия.

Для проведения вышеизложенных испытаний использовались весы GP-32K, пресс Controls 50-C8455, испытательная машина Instron 3382 с датчиком раскрытия трещин C.O.D Gauge.

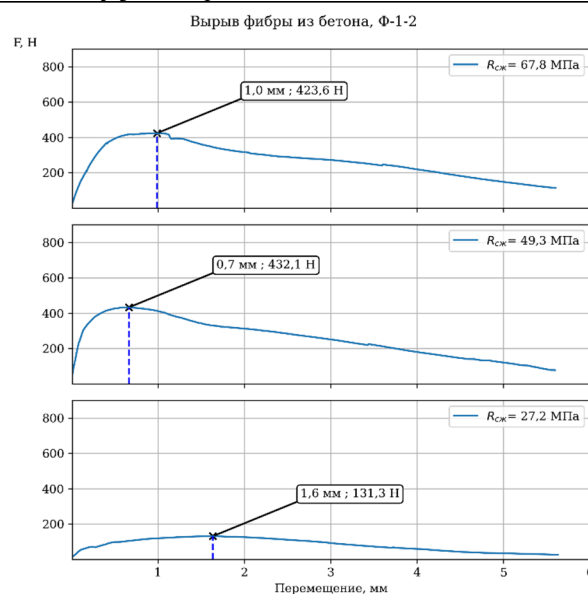
Результаты исследования. Результаты испытаний по определению сцепления фибры с бетоном представлены на рисунке 7. Графики были построены на основе усредненных результатов, рассчитанных по формуле 1:

$$P_{i\text{среднее}} = \frac{\sum_{j=1}^n P_{ij}}{n}, \quad (1)$$

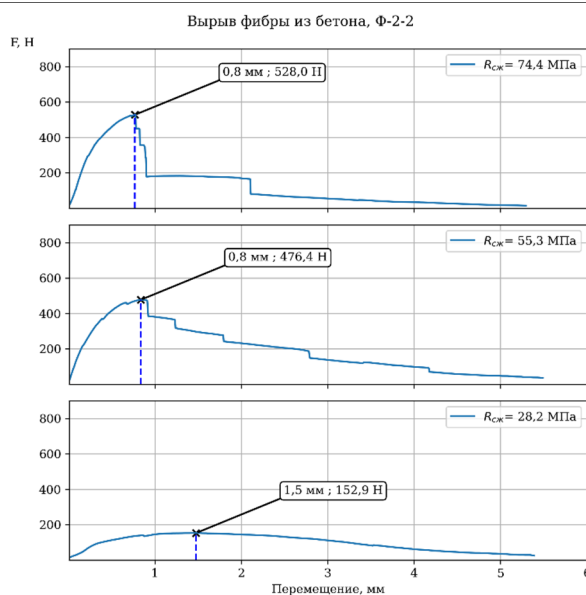
где $P_{i\text{среднее}}$ – значение нагрузки при i -м перемещении, P_{ij} – значение нагрузки при i -м перемещении у j -го образца.



а)



б)



в)

Рис. 7. Результаты испытаний на вырыв фибры из бетона для различных матриц бетона по прочности для волокна:

а) Ф1-1, б) Ф1-2, в) Ф2-2

Данные результаты корректны для расчета напряжений, возникающих в фибробетоне, так как в материале имеется большое количество волокон и важно усредненное значение напряжений всех волокон в сечении при определенной

ширине раскрытия трещины. В случае если важно оценить напряжения в одном волокне и характеристику его сцепления с бетоном, то необходимо оценивать среднее значение максималь-

ных напряжений, возникающих в каждом испытании. Посчитать данную характеристику можно по формулам 2, 3.

$$P_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n P_{maxj}}{n} \quad (2)$$

$$\delta_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n f(P_{maxj})}{n} \quad (3)$$

где δ_{max} – перемещение волокна, соответствующее максимальному значению нагрузки; P_{maxj} – максимальная нагрузка при испытании j -го образца.

Анализ полученных результатов показал, что при использовании волокна Ф1-1, с повышением прочности матрицы, наблюдается увеличение прочности сцепления и смещения при пиковой нагрузке. Такое поведение может свидетельствовать о том, что при низкой прочности матрицы происходит её разрушение в зоне выступов стеклокомпозитной фибры. В то же время, при высокой прочности бетона разрушение происходит за счет сдвига или смятия навивки волокна, что, в свою очередь, приводит к большим смещениям.

Из данных, представленных на графике (рис. 8, а), видно, что по мере увеличения прочности матрицы на осевое сжатие, сцепление фибры с бетоном устремляется к определенному пределу.

Так при касательных напряжениях в 20 МПа, возникающих в контактной зоне, в фибре возникает напряжение 750 МПа. В связи с высокими напряжениями, возникающими при выдергивании стеклокомпозитной фибры происходит нарушение целостности стеклокомпозитной фибры, а не контактной зоны бетона, из-за чего прочность сцепления не зависит от дальнейшего повышения прочности матрицы бетона.

Исходя из вышесказанного, сцепление фибры с бетоном обоснованно аппроксимируется по экспоненциальной функции.

$$\tau_{\Phi 1-1}^{avg} = 22,34 - 50,00 \cdot e^{-0,05R_b} \quad (4)$$

$$\tau_{\Phi 1-2}^{avg} = 14,29 - 150,91 \cdot e^{-0,10R_b} \quad (5)$$

$$\tau_{\Phi 2-2}^{avg} = 16,00 - 150,89 \cdot e^{-0,09R_b} \quad (6)$$

Средние касательные напряжения для построения графика посчитаны по формуле 7. По результатам расчета получили следующие данные, выведенные в таблице 3.

$$\tau_{avg} = \frac{P_{max}}{S_0^{con}} \quad (7)$$

где P_{max} – пиковая нагрузка, при вытягивании фибры, S_0^{con} – площадь контакта фибры с бетоном в начальный момент испытания.

Таблица 1

Результаты испытаний на вытягивание волокна из бетона

№	Маркировка *	P_{max} Н	δ_{max} мм	σ_f^{max} МПа	Прочность бетона на сжатие МПа	Площадь контакта мм ²	τ_{avg} МПа
1	Ф1-1 МЗБ-0,56	320,1	1,11	343,1	27,4	34,3	9,3
2	Ф1-1 МЗБ-0,45	392,9	1,36	421,1	37,6	34,3	11,5
3	Ф1-1 МЗБ-0,37	620,0	1,47	644,4	48,2	34,3	18,1
4	Ф1-1 МЗБ-0,30	716,0	1,54	767,3	57,6	34,3	20,9
5	Ф1-1 МЗБ-0,25	688,1	1,60	737,4	76,2	34,3	20,1
6	Ф1-2 МЗБ-0,56	137,8	2,00	147,7	27,2	33,2	4,2
7	Ф1-2 МЗБ-0,30	450,5	1,26	482,8	49,3	33,2	13,6
8	Ф1-2 МЗБ-0,25	446,6	1,36	478,5	67,8	33,2	13,5
9	Ф2-2 МЗБ-0,56	163,0	2,09	174,6	28,2	33,5	4,9
10	Ф2-2 МЗБ-0,30	496,8	1,53	532,4	55,3	33,5	14,8
11	Ф2-2 МЗБ-0,25	545,4	1,51	584,4	74,4	33,5	16,3

*маркировка состава включает: маркировку используемой фибры в соответствии с таблицей 2 – вид бетона (мелкозернистый бетон) – водоцементное соотношение

Аналогично, обоснованию формул 4–6, проводилась аппроксимация экспериментальных данных по значениям смещений волокна при максимальной нагрузке при выдергивании фибры.

На рисунке 8 (а) показаны результаты напряжений, возникающих в волокне с различной геометрией. Полученные аппроксимирующие зависимости похожи между собой характером, резкое возрастание функции на начальном этапе и выход на плато по мере увеличения фактора по оси X.

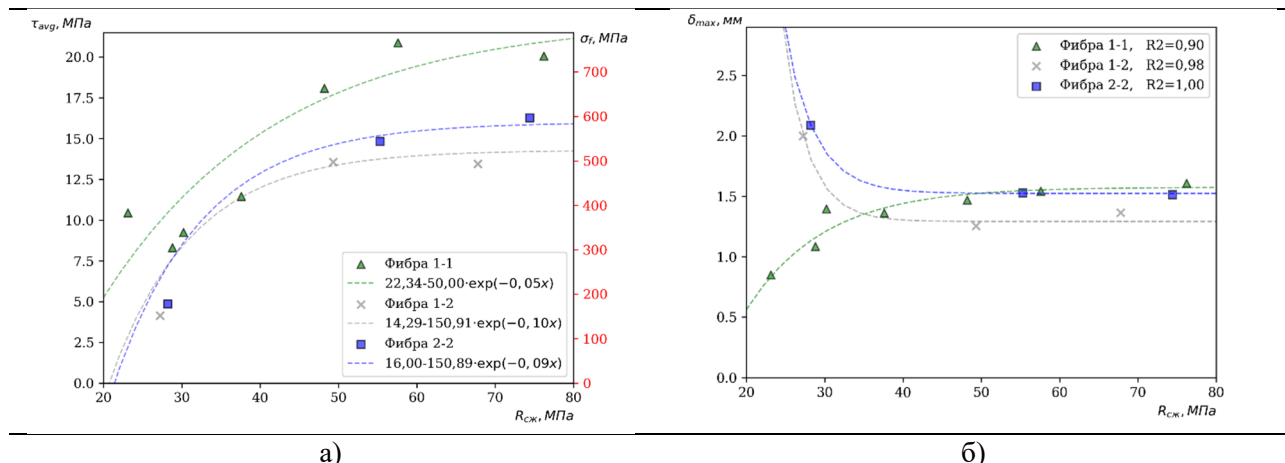


Рис. 8. Результаты вырва волокна в зависимости от прочности матрицы:

а) по максимальным напряжениям, б) по перемещениям в момент максимальных значений напряжения в волокне

На рисунке 8 (б) изображено изменение смещений волокна при максимальной нагрузке. Видно изменение характера аппроксимирующей функции в зависимости от вида волокна: для 1–1 при увеличении нагрузки и увеличении прочности матрицы увеличивается смещение, для 1–2 и 2–2 при увеличении прочности матрицы уменьшается смещение. После достижения прочности матрицы до определенного значения смещение находится на 1,5 мм для каждого волокна. Вероятно, это можно объяснить исчерпанием прочностных характеристик волокна и его элементов при больших деформациях. Так на волокнах 1–1 и 1–2 имеющие навивку с шагом 4 и 10 мм, соответственно, при матрицах от 50 МПа и больше, в результате испытаний виден невооруженным взглядом срыв навивки. На малых прочностях матрицы видна разная работа волокна в бетоне для более редкой навивки прочность сцепления ниже, смещения больше в сравнении с частой навивкой.

$$\delta_{\Phi 1-1}^{\max} = 1,57 - 7,61 \cdot e^{-0,10R_b} \quad (8)$$

$$\delta_{\Phi 1-2}^{\max} = 1,29 - 3809,59 \cdot e^{-0,32R_b} \quad (9)$$

$$\delta_{\Phi 2-2}^{\max} = 1,52 - 1000,00 \cdot e^{-0,27R_b} \quad (10)$$

Из рисунка 9 (а), (б), (в) можно выделить 2 характера разрушения фибробетонных образцов: в случае если начало трещинообразования характеризуется падением нагрузки, то это свидетельствует о вытягивании волокна из бетона без сопротивления, в обратном случае это говорит о зацеплении волокна за бетон. Наличие зацепления зависит от нескольких факторов, таких как концентрация волокон, особенности волокна и прочность матрицы. Фибробетон с волокнами типа

Ф1-1 проявляет хорошую совместную работу уже на концентрации 0,8 % от объема образца, а его прочность на изгиб увеличивается в более чем в 2 раза. Для волокон Ф1-2 зацепление происходит на концентрации 1,2 % от объема образца, а при концентрации 1,6 % прочность на изгиб увеличивается более чем в 1,5 раза. Волокно типа Ф2-2 проявило себя несколько хуже: концентрация при зацеплении составила 1,6 % от объема образца, а прочность на изгиб увеличилась в 1,5 раза.

В таблице 4 представлены результаты испытаний фибробетона по определению остаточной прочности на растяжение, где наилучшим образом показал себя фибробетон с волокном Ф1-1 с навивкой с шагом 4 мм. Аналогичные положительные результаты получены для выдергивания волокна из бетона. Формулы для расчета величин из таблицы 4 принимаются в соответствии с СП 297.1325800.2017.

Для фибробетона вследствие изменения характера разрушения важной характеристикой является не только прочность, но и вязкость разрушения, характеризующаяся энергией разрушения (G) и критическим коэффициентом интенсивности напряжений (K_c^*) (формулы 11 и 12).

$$G = \frac{\int P_i d\delta}{A}, \quad (11)$$

где A – площадь, спроецированная на плоскость, перпендикулярную направлению напряжения при нагружении образца, $\int P d\delta$ – энергозатраты на разрушения образца, вычисляется как площадь под графиком «нагрузка-раскрытие трещины».

$$K_c^* = \frac{3P_{\max}}{2h^2 \cdot b} \sqrt{\frac{a_0}{h}} (1,93 - 3,07\lambda + 1,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4), \quad (12)$$

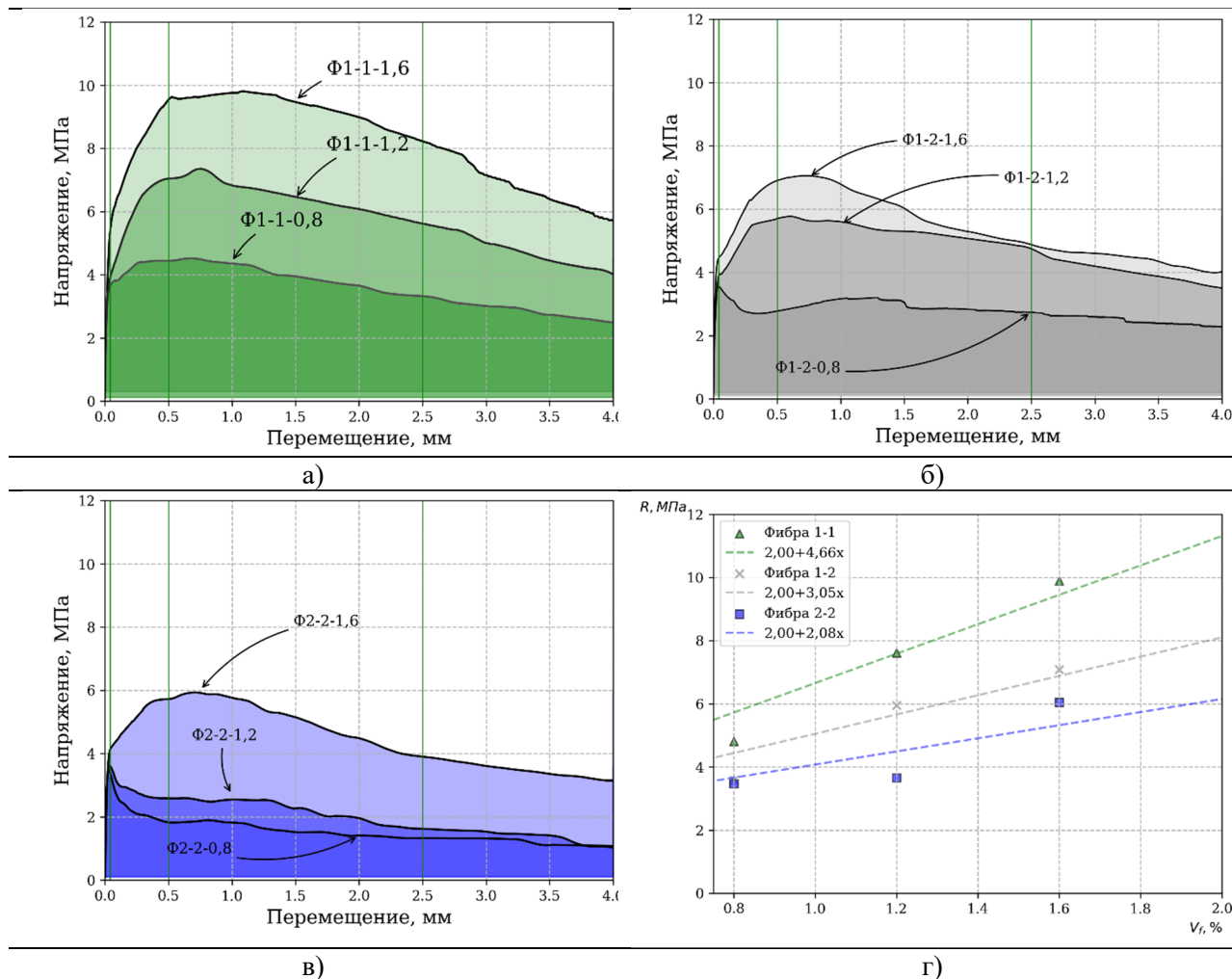


Рис. 9. Результаты испытаний по определению остаточной прочности фибробетона на растяжение:
а) с волокном Φ1-1, б) волокно Φ1-2, в) волокно Φ2-2

где $\lambda = a_0/h$ – относительная длина начального надреза.

Таблица 2

Расчет класса по остаточной прочности фибробетона на растяжение

№	Маркировка	Концентрация, по объему %	R_{FeI} , МПа	$R_{0,5}$, МПа	$R_{2,5}$, МПа	$R_{fbt,n}$, МПа	$R_{fbt2,n}$, МПа	$R_{fbt3,n}$, МПа	$\underline{B}_{fb}$
1	Φ1-1-0.8	0,8	3,71	4,42	3,33	3,40	3,75	2,78	2.5b
2	Φ1-1-1.2	1,2	4,05	7,10	5,60	2,83	5,89	3,97	3.5b
3	Φ1-1-1.6	1,6	5,68	9,54	8,23	5,11	8,52	6,67	6.5c
4	Φ1-2-0.8	0,8	3,53	2,78	2,74	3,37	2,60	2,69	2.5d
5	Φ1-2-1.2	1,2	3,95	5,67	5,01	3,74	4,96	4,91	4.5d
6	Φ1-2-1.6	1,6	4,51	6,91	4,56	4,19	5,43	4,34	4c
7	Φ2-2-0.8	0,8	3,26	1,82	1,33	3,09	1,26	0,85	–
8	Φ2-2-1.2	1,2	3,56	2,59	1,62	3,46	2,53	1,26	1a
9	Φ2-2-1.6	1,6	4,20	5,72	3,90	3,90	5,06	3,00	3b

Результаты расчетов приведённых образцов представлены в таблице 3. G_i – удельные энергозатраты на разрушение образца до момента движения магистральной трещины, G_f – удельные энергозатраты на раскрытие магистральной трещины до 1/100 длины пролета балки.

Полученные характеристики в исследованиях [28–30] выполнены по схожей методике, но

поддаются сравнению с текущими результатами, так как удельные энергозатраты рассчитывались исходя из полной диаграммы до разрушения образцов на две части, в то время как в данной работе удельные энергозатраты рассчитывались на ширину раскрытия трещины 1/100 от длины пролеты балки.

В таблице 4 представлены сравнительные результаты, полученные по схожей методике для

стальной фибры при тех же концентрациях волокна, которые исследуются в данной работе. Видно, что при увеличении концентрации волокна повышается не только энергия, затрачиваемая на развитие магистральной трещины, но и энергия, которая уходит на создание магистральной трещины. Данный эффект справедливо для стеклокомпозитного волокна и стального, что объясняется увеличением прочности на растяжение фибробетона, что согласуется с результатами ранее проведенных исследований/других исследователей [31].

Для сравнения приведены аналогичные характеристики вязкости разрушения для сталефибробетона из другого исследования. Из таблицы 6 видно, что стальная фибра по энергетическим характеристикам не сильно отличается от стеклокомпозитного волокна. Схожие показатели сравнения стеклокомпозитной фибры со стальной фиброй доказывают, что новый вид

фибры может быть интересен для применения в строительных конструкциях.

Таблица 3

Результаты расчета фибробетона на вязкость разрушения

№	Маркировка	G_i $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	G_F $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	K_c^* $\text{МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$
1	Контр.	12,0	132,6	0,401
2	Ф1-1-0.8	31,3	2200,6	0,593
3	Ф1-1-1.2	28,0	3524,7	0,922
4	Ф1-1-1.6	41,6	5136,9	1,257
5	Ф1-2-0.8	18,8	1688,1	0,429
6	Ф1-2-1.2	25,7	3062,4	0,713
7	Ф1-2-1.6	27,6	3139,4	0,852
8	Ф2-2-0.8	10,8	933,1	0,423
9	Ф2-2-1.2	15,5	1203,5	0,444
10	Ф2-2-1.6	31,1	2711,1	0,733

Таблица 4

Результаты расчета фибробетона на вязкость разрушения из работы [11]

№	Маркировка	G_i $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	G_F $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	K_c^* $\text{МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$
1	СФ-0.8	29,8	2675,9	0,522
2	СФ-1.2	39,7	4294,0	0,936
3	СФ-1.6	44,43	5787,6	1,187

Заключение и обсуждение. В работе описаны исследования характеристик сцепления волокна в зависимости от их геометрической формы.

1. Основываясь на графиках рисунка 7, можно сделать вывод, что предел прочности навивки волокна на срез достигается при его смещении на ~1,5 мм. Целью дальнейшего исследования может быть прямое обоснование работы волокна в прочной матрице. В матрицах средней и низкой прочности вытягивание волокна достигается за счет разрушения бетона, последний в таком случае работает на срез и смятие. Если материал разрушается при достижении прочности на срез, то максимальная нагрузка выдергивания фибры должна быть достигнута при меньших значениях смещения, что и наблюдается для фибры Ф1-1.

2. Аппроксимирующая функция увеличения прочности сцепления волокна и изменение смещения при максимальной нагрузке во время выдергивания, является экспоненциальной. Затушение роста прочности сцепления связано с достижением прочности волокна, либо в случае волокна с навивкой, последняя срезается при достижении предела прочности на срез.

3. По результатам работы было доказано существенное влияние геометрической формы волокна на прочность сцепления стеклокомпозитного волокна с бетоном. Волокно Ф1-1 более, чем в 1,5 раза имеет большую прочность сцепления в сравнении с волокнами другого периодического профиля. Положительная тенденция сохраняется и для фибробетонов, так на волокне Ф1-1 с шагом навивки ~4 мм фибробетон имеет остаточную прочность на растяжение в 2 раза превышающую другие виды стеклокомпозитной фибры и в 3 раза превышающую предел прочности на растяжение при изгибе для обычного тяжелого бетона.

4. С повышением количества волокон увеличивается не только предел прочности материала, но и разрушение становится более вязким. При использовании фибры Ф1-1 требуется в 38 раз больше энергии для разрушения образца чем для обычного бетона такого же класса.

В продолжении работы необходимо более подробно исследовать механизм разрушения стеклокомпозитного волокна с учетом ортотропной структуры материала. Для активного внедрения производства волокна следует провести дополнительные исследования на долговечность конструкций из дисперсно-армированного стек-

локомпозитной фиброй бетона, проверить эксплуатационные характеристики материала, в том числе проанализировать стойкость данного материала в агрессивной среде, а также рассмотреть фибробетон с точки зрения проектирования. Выделить граничные значения для эффективной и безопасной работы фибробетона со стеклокомпозитной фиброй. Предельно допустимые нагрузки и перемещения изделий из фибробетона из стеклокомпозитной фибры может выгодно отличаться от сталефибробетонов в силу особенностей взаимодействия стеклокомпозитной фибры с бетонной матрицей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Goto Y., Otsuka K. Experimental studies on cracks formed in concrete around deformed tension bars // *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 1980. Vol. 1980, № 294. Pp. 85–100. DOI: 10.2208/jscej1969.1980.294_85.
2. Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р. Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 30–38.
3. Лапшинов А.Е. Исследование работы СПА и БПА на сжатие // *Вестник МГСУ*. 2014. № 1. С. 52–57.
4. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по строительным специальностям. 5-е изд. Москва: АСВ, 2011. 524 с.
5. Kurumatani M., Nemoto Y., Okazaki S., Hirose S. Simulaion of crack-paths formed in concrete around deformed tension bar // *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 2014. Pp. 20140008–20140008. DOI: 10.1142/jscs.2014.20140008.
6. Мелешко А.И., Половников С.П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. Мос: «САЙНС-ПРЕСС», 2007. 192 с.
7. Nurtdinov M., Solovyev V., Panchenko A. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete // *MATEC Web Conferences*. 2016. Vol. 86. Pp. 1–5. DOI: 10.1051/matec-conf/20168604026.
8. Пустовгар А.П., Абрамова А.Ю. Дисперсное армирование бетонов и строительных растворов // *Новые технологии в строительстве*. 2023. Т. 9, Вып. 3, С. 126–140, DOI: 10.24412/2409-4358-2023-3-126-140
9. Леонович И.А., Леонович А.А. Влияние упругих характеристик композитного материала на свойства фибробетона // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2007. Т. 16, № 3. С. 148–155. DOI: 10.53078/20778481_2007_3_148.
10. Ключев С.В. К вопросу фибрового армирования бетонов // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2018. Т. 230–231, № 3–4. С. 42–47.
11. Соловьев В.Г., Сизяков И.Д. Физико-механические свойства бетонов со стеклопластиковой фиброй // *Сборник Материалов III Всероссийской Научной Конференции Посвящённой Девяностолетию Кафедры Строительного Материаловедения*. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. С. 278–283.
12. Сизяков И.Д. Трещиностойкость бетона со стеклопластиковой и стальной фиброй // *Инженерный вестник Дона*. 2024. Т. 5, № 113. С. 379–387.
13. Muhammad J.H., Yousif A.R. Effect of basalt minibars on the shear strength of BFRP-reinforced high-strength concrete beams // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. Pp. e02020. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02020.
14. Song P.S., Hwang S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2004. Vol. 18, № 9. Pp. 669–673. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027.
15. Afroughsabet V., Ozbakkaloglu T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 94. Pp. 73–82. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.
16. Yoo D.-Y., Yoon Y.-S., Banthia N. Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate // *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 64. Pp. 84–92. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.001.
17. Kaïkea A., Achoura D., Duplan F., Rizzuti L. Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high performance fiber reinforced concrete // *Materials & Design*. 2014. Vol. 63. Pp. 493–499. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.06.066.
18. Soutsos M.N., Le T.T., Lampropoulos A.P. Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 36. Pp. 704–710. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042.
19. Soulioti D.V., Barkoula N.M., Paipetis A., Matikas T.E. Effects of Fibre Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete // *Strain*. 2011. Vol. 47, № s1. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x.
20. Nanni A. Properties of Aramid-Fiber Reinforced Concrete and SIFCON // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1992. Vol. 4, № 1. Pp. 1–15. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:1(1).

21. Yao W., Li J., Wu K. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33, № 1. Pp. 27–30. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00913-4.

22. Нуртдинов М.Р., Соловьев В.Г., Бурьянов А.Ф. Применение композиционной фибры в тяжелых бетонах // Бетон и железобетон. 2021. Т. 605, № 3. С. 33–39.

23. Shafiq N., Ayub T., Khan S.U. Investigating the performance of PVA and basalt fibre reinforced beams subjected to flexural action // Composite Structures. 2016. Vol. 153. Pp. 30–41. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.06.008.

24. Yin S., Tuladhar R., Collister T., Combe M., Sivakugan N., Deng Z. Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. Pp. 1069–1077. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.056.

25. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография. Москва: Издательство АСВ, 2004. 560 с.

26. Холмянский М.М. Контакт бетона с арматурой. Москва: Стройиздат, 1981. 184 с.

27. Naaman A.E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement

Composites // Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1, № 3. Pp. 241–252. DOI: 10.3151/jact.1.241.

28. Wu H., Zang Z., Deng S., Shen A., Cai Y., Ren G., Pan H. Recent developments in pullout behaviors and tensile properties of ultra-high-performance concrete reinforced with steel fiber // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2023. Vol. 23, № 3. Pp. 216. DOI: 10.1007/s43452-023-00761-0.

29. Кострикин М.П. Дисперсно армированные бетоны с применением синтетической макрофибры. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2022. 191 с.

30. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Развитие метода испытания трещиностойкости сталефибробетона // Экономика строительства. 2023. № 9. С. 132–137.

31. Жаворонков М.И. Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. Т. 33, № 3. С. 114–120.

32. Yazıcı Ş., İnan G., Tabak V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC // Construction and Building Materials. 2007. Vol. 21, № 6. Pp. 1250–1253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025

Информация об авторах

Соловьев Вадим Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения. E-mail: s.vadim_g@mail.ru. Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва г, Ярославское ш, д. 26.

Сизяков Иван Дмитриевич, аспирант, преподаватель кафедры строительного материаловедения. E-mail: sid89152578878@yandex.ru. Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва г, Ярославское ш, д. 26.

Веселов Владимир Константинович, магистр кафедры строительного материаловедения. E-mail: distveselov@mail.ru. Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва г, Ярославское ш, д. 26.

Поступила 04.04.2024 г.

© Соловьев В.Г., Сизяков И.Д., Веселов В.К., 2025

Solovev V.G., *Sizyakov I.D., Veselov V.K.

National Research Moscow State University of Civil Engineering

**E-mail: sid89152578878@yandex.ru*

INCREASE OF CRACK RESISTANCE OF FRC BY OPTIMIZATION OF GLASS-COMPOSITE MACROFIBER SHAPE

Abstract. The study aims to investigate new types of reinforcing elements in concrete–glass fiber composites (GFCs) – as an alternative to steel and rod reinforcement. This research is relevant due to the need to reduce the material consumption and weight of structures. The complexity lies in the poorly predictable interaction of the fiber with the concrete matrix due to its anisotropy and non-standard geometry.

This paper describes the main test methods for assessing the adhesion quality of GFCs to concrete and identifies the main regulatory documents used for the tests. The subject of the study is heavy fiber-reinforced concrete based on GFCs: straight tests with 4 mm and 10 mm windings, as well as a wave test with a periodic profile pitch of 8 mm.

Based on the test results, the dependence of fiber adhesion strength on the strength of the concrete matrix is presented. The dependence has an exponentially increasing nature, which can be used to identify the effective application of GFCs in concrete. It was determined that a concrete matrix with a fiber-reinforced concrete bond strength of 30 to 50 MPa is optimal for fiber-reinforced concrete. Fibers with a 4 mm winding pitch achieve 20 MPa in the concrete matrix. Subsequently, tests were conducted to determine the crack resistance of fiber-reinforced concrete with various fiber configurations, where the optimal fiber concentrations and shapes were identified. Fibers with a 4 mm winding pitch demonstrated excellent results, with the specific energy consumption for opening a main crack amounting to 5139.6 J/m² and a stress intensity factor of 1.26. Crack resistance and pullout strength tests revealed the optimal fiber geometry. These results confirm the feasibility of using fiber-reinforced concrete as a replacement for steel in certain applications where the properties of lighter, corrosion-resistant fiber are essential. The study experimentally demonstrates that adhesion strength is related to the geometry of the fiberglass composite.

Keywords: fiber-reinforced concrete, fiberglass composite fiber, composite, crack resistance, fiber adhesion, fiber, fiber pullout.

REFERENCES

1. Goto Y., Otsuka K. Experimental studies on cracks formed in concrete around deformed tension bars. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 1980. Vol. 1980, No 294. Pp. 85–100. DOI: 10.2208/jscej1969.1980.294_85.
2. Hozin V.G., Gizdatullin A.R. Compatibility of polymer composite reinforcement with cement concrete in structures [Sovmestimost' polimerkompozitnoj armatury s cementnym betonom v konstrukciyah]. *Construction Materials Russia*. 2017. No 11. Pp. 30–38. (rus)
3. Lapshinov A.E. Study of the compression performance of GFRP and BFRP bars [Issledovanie raboty SPA i BPA na szhatie]. *Vestnik MGSU*. 2014. No 1. Pp. 52–57. (rus)
4. Bazhenov Y. M. Technology of concrete: textbook for students of higher educational institutions studying in construction specialties [Tekhnologiya betona: uchebnik dlya studentov vysshih uchebnykh zavedenij, obuchayushchihhsya po stroitel'nyim special'nostyam]. Moscow: ACV, 2011. 524 p. (rus)
5. Kurumatani M., Nemoto Y., Okazaki S., Hirose S. Simulaion of crack-paths formed in concrete around deformed tension bar. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 2014. Pp. 20140008–20140008. DOI: 10.11421/jsces.2014.20140008.
6. Meleshko A.I., Polovnikov S.P. Carbon, carbon fibers, carbon composites [Uglerod, uglerodnye volokna, uglerodnye kompozity]. Moscow: «SAJNS-PRESS», 2007. 192 p. (rus)
7. Nurtdinov M., Solovyev V., Panchenko A. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete. *MATEC Web Conferences*. 2016. Vol. 86. Pp 1–5. DOI: 10.1051/matec-conf/20168604026
8. Pustovgar A.P., Abramova A.Yu. Disperse reinforcement of concrete and mor tar [Dispersnoe armirovanie betonov i stroitel'nyh rastvorov]. *New Technologies in Construction*. 2023. Vol. 9, Issu 3, Pp. 126–140. DOI: 10.24412/2409-4358-2023-3-126-140 (rus)
9. Leonovich I.A., Leonovich A.A. Influence resilience characteristic of composite materials on properties fibre concretes [Vliyanie uprugih harakteristik kompozitnogo materiala na svoystva fibrobetona]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2007. No 3. Pp. 148–155. DOI: 10.53078/20778481_2007_3_148. (rus)
10. Klyuev S.V. Toward the question of fiber reinforcement of concrete [K voprosu fibrovogo armirovaniya betonov]. *Stroitelnye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2018. Vol. 230–231, No 3–4. Pp. 42–47. (rus)
11. Solovev V.G., Sizyakov I.D. Mechanical properties of concrete with glass-composite fibers [Fiziko-mekhanicheskie svoystva betonov so stekloplastikovoj fibroj]. *Sbornik Materialov III Vserossijskoj Nauchnoj Konferencii Posvyashchyonnoj Devyanostoletiyu Kafedry Stroitel'nogo Materialovedeniya*. Moscow: MGSU, 2023. Pp. 278–283. (rus)
12. Sizyakov I.D. Residual strength of concrete with fibreglass and steel fibres [Treshchinostojkost' betona so stekloplastikovoj i stal'noj fibroj]. *Engineering Journal of Don*. 2024. Vol. 5, No 113. Pp. 379–387. (rus)
13. Muhammad J.H., Yousif A.R. Effect of basalt minibars on the shear strength of BFRP-reinforced high-strength concrete beams. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. Pp. e02020. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02020.
14. Song P.S., Hwang S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*.

2004. Vol. 18, No 9. Pp. 669–673. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027.

15. Afroughsabet V., Ozbakkaloglu T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 94. Pp. 73–82. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.

16. Yoo D.-Y., Yoon Y.-S., Banthia N. Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate. *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 64. Pp. 84–92. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.001.

17. Kaïkea A., Achoura D., Duplan F., Rizzuti L. Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high-performance fiber reinforced concrete. *Materials & Design*. 2014. Vol. 63. Pp. 493–499. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.06.066.

18. Soutsos M.N., Le T.T., Lampropoulos A.P. Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 36. Pp. 704–710. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042.

19. Soulioti D.V., Barkoula N.M., Paipetis A., Matikas T.E. Effects of Fibre Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete. *Strain*. 2011. Vol. 47, No s1. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x.

20. Nanni A. Properties of Aramid-Fiber Reinforced Concrete and SIFCON. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1992. Vol. 4, No 1. Pp. 1–15. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:1(1).

21. Yao W., Li J., Wu K. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33, No 1. Pp. 27–30. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00913-4.

22. Nurtdinov M.R., Solovev V.G., Bur'yanov A.F. The use of composite fibers in heavy concrete. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2021. Vol. 605, No 3. Pp. 33–39. (rus)

23. Shafiq N., Ayub T., Khan S.U. Investigating the performance of PVA and basalt fibre reinforced beams subjected to flexural action. *Composite Structures*. 2016. Vol. 153. Pp. 30–41. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.06.008.

24. Yin S., Tuladhar R., Collister T., Combe M., Sivakugan N., Deng Z. Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. Pp. 1069–1077. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.056.

25. Rabinovich F.N. Composites based on disperse reinforced concretes. Theory and design issues, technology, structures [Kompozity na osnove dispersno armirovannyh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii]. Moscow: ACV, 2004. 560 p. (rus)

26. Holmyanskij M.M. Contact between concrete and reinforcement [Kontakt betona s armaturoj]. Moscow: Strojizdat, 1981. 184 p. (rus)

27. Naaman A.E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003. Vol. 1, No 3. Pp. 241–252. DOI: 10.3151/jact.1.241.

28. Wu H., Zang Z., Deng S., Shen A., Cai Y., Ren G., Pan H. Recent developments in pullout behaviors and tensile properties of ultra-high-performance concrete reinforced with steel fiber. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 23, No 3. Pp. 216. DOI: 10.1007/s43452-023-00761-0.

29. Kostrikin M.P. Dispersed-reinforced concretes with synthetic macrofibers [Dispersno armirovannye betony s primeneniem sinteticheskoy makrofibr]. Saint-Petersburg: SPbGASU, 2022. 191 p. (rus)

30. Pukharensko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Development of a method for testing the crack resistance of steel fiber reinforced concrete [Razvitiye metoda ispytaniya treshchinostojkosti stalefibrobetona]. *Construction economics*. 2023. No 9. Pp. 132–137. (rus)

31. Zhavoronkov M.I. Determining characteristics of the destruction and elasticity modulus of fiber-reinforced concrete [Opredelenie harakteristik razrusheniya i modulya uprugosti fibrobetona]. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2015. Vol. 33, No 3. Pp. 114–120. (rus)

32. Yazıcı Ş., İnan G., Tabak V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21, No 6. Pp. 1250–1253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025.

Information about the authors

Solovev, Vadim G. PhD, Associate professor of construction materials science Department. E-mail: s.vadim_g@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow r, Yaroslavskoe highway, 26.

Sizyakov, Ivan D. Postgraduate student, Lecturer of construction materials science Department. E-mail: sid89152578878@yandex.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow r, Yaroslavskoe highway, 26.

Veselov, Vladimir K. Student of construction materials science Department. E-mail: distveselov@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow г, Yaroslavskoe highway, 26.

Received 04.04.2025

Для цитирования:

Соловьев В.Г., Сизяков И.Д., Веселов В.К. Повышение трещиностойкости фибробетона за счет оптимизации формы стеклокомпозитного волокна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 8–21. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-8-21

For citation:

Solovev V.G., Sizyakov I.D., Veselov V.K. Increase of crack resistance of frc by optimization of glass-composite macrofiber shape. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 8–21. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-8-21