

УДК 691.328

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445>

EDN: OZZCHD

Научная статья



ВЛИЯНИЕ ВИДА ФИБРЫ И СОСТАВА МАТРИЦЫ НА ИХ СЦЕПЛЕНИЕ В ФИБРОБЕТОНЕ

Ю. В. Пухаренко^{1,2}, Д. А. Пантелеев^{2*}, М. И. Жаворонков²

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью статьи является определение влияния профиля стальной фибры и состава матрицы на их сцепление в дисперсно-армированном бетоне.

Материалы и методы. Проведены исследования с применением методов испытаний, изложенных в национальных стандартах. Для определения характеристики прочности сцепления волокон с матрицей использовалась оригинальная методика, разработанная в СПбГАСУ.

Результаты. Определена степень влияния геометрической формы стальных фибр – анкерной и волнового профиля на характеристику прочности сцепления. Произведена оценка прочности сцепления стальной фибры с цементной и бетонной матрицей ($\text{Ц/П} = 1:1$, $\text{Ц/П} = 1:2$ и $\text{Ц/П} = 1:3$). Экспериментально доказано влияние объемной доли цементного теста на характеристику прочности сцепления стальной фибры с матрицей.

Заключение. Полученные экспериментальные данные подтверждают эффективность дисперсного армирования путем применения анкерной фибры в сочетании с рационально подобранным составом бетонной матрицы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композит, дисперсное армирование, фибробетон, фибра, матрица, состав, сцепление, прочность.

БЛАГОДАРНОСТИ: статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательских работ, проводимых по Плану фундаментальных исследований РААСН и Минстроя России, и 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 22.04.2022; одобрена после рецензирования 03.06.2022; принята к публикации 10.06.2022.

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. Влияние вида фибры и состава матрицы на их сцепление в фибробетоне // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 3 (85). С. 436-445. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445>

© Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445>

EDN: OZZCHD

Original article

INFLUENCE OF FIBER TYPE AND MATRIX COMPOSITION ON ADHESIVE STRENGTH IN FIBER REINFORCED CONCRETE

Yury V. Pukharensko¹, Dmitrii A. Panteleev^{2*}, Mikhail I. Zhavoronkov²

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 article is to determine the influence of the steel fiber profile and the composition of the matrix on their adhesion in dispersed reinforced concrete.

Materials and methods. Studies have been carried out using the test methods set out in national standards. To determine the characteristics of the adhesion strength of fibers with a matrix, an original technique developed at SPbGASU was used.

Results. The degree of influence of the geometric shape of steel fibers – anchor and wave profile on the adhesion strength characteristic is determined. The adhesion strength of steel fiber with cement and concrete matrix was assessed (Cement: Sand = 1:1, Cement: Sand = 1:2 and Cement: Sand = 1:3). The influence of the volume fraction of the cement paste on the characteristic of the adhesion strength of the steel fiber with the matrix has been experimentally proven.

Conclusions. The experimental data obtained confirm the effectiveness of dispersed reinforcement through the use of anchor fibers in combination with a rationally selected composition of the concrete matrix.

KEYWORDS: composite, fiber reinforcement, fiber reinforced concrete, fiber, matrix, composition, adhesion, bending strength.

ACKNOWLEDGMENTS. The article is published based on the results of the research work carried out according to the Plan for Fundamental Research of the RAASN and the Ministry of Construction of Russia, and within the framework of the competition for grants for the performance of research work by scientific and academic staff of SPbGASU (Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering) in 2022.

The article was submitted 22.04.2022; approved after reviewing 03.06.2022; accepted for publication 10.06.2022.

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: Yury V. Pukharensko, Dmitrii A. Panteleev, Mikhail I. Zhavoronkov 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. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445>

© Pukharensko Y. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Фибробетон как композиционный материал действует за счёт совместной работы армирующих волокон и бетона. Наиболее эффективная совместная работа достигается только при высоком уровне сцепления всех материалов. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что именно прочность сцепления фибры с матрицей композита определяет характер разрушения материала и является основной возможностью повышения его прочности [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Сцеплением называется способность фибры воспринимать напряжения при воздействии внешних нагрузок. По принципу действия сцепление можно разделить на адгезионное и механическое.

Адгезионное сцепление – это сцепление, которое образуется при межмолекулярном взаимодействии в поверхностном слое между волокном и матрицей композита (зависит от материала, из которого изготовлена фибра).

Механическое сцепление – это сцепление, которое обусловлено непрямолинейной геометрической формой фибры (различные изгибы, выпуски, трение). Именно механическое

сцепление в значительно большей степени определяет эффективность работы дисперсного армирования.

Таким образом, сцепление фибры с матрицей композита является результатом комбинированного проявления адгезии, трения и механического зацепления в зоне их контакта с цементным камнем. Каждый из этих факторов может по-разному влиять на анкеровку волокон в матрице, что во многом зависит от состава, структуры и свойств цементного камня, а также от материала волокна, его формы и размеров [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Хорошо известно, что напряжение распределяется по длине волокна равномерно, от концов к середине [16]. При этом существует такая критическая длина волокна (l_c), при увеличении которой ($l_f > l_c$) в нем возникают напряжения, превышающие его прочность и приводящие к разрыву, а при уменьшении ($l_f < l_c$) напряжения в волокне не достигают его прочности и оно вытягивается из матрицы при разрушении композита. В случае использования для армирования композита волокон гладкого профиля напряжения распределяются в соответствии с рисунком 1, а).

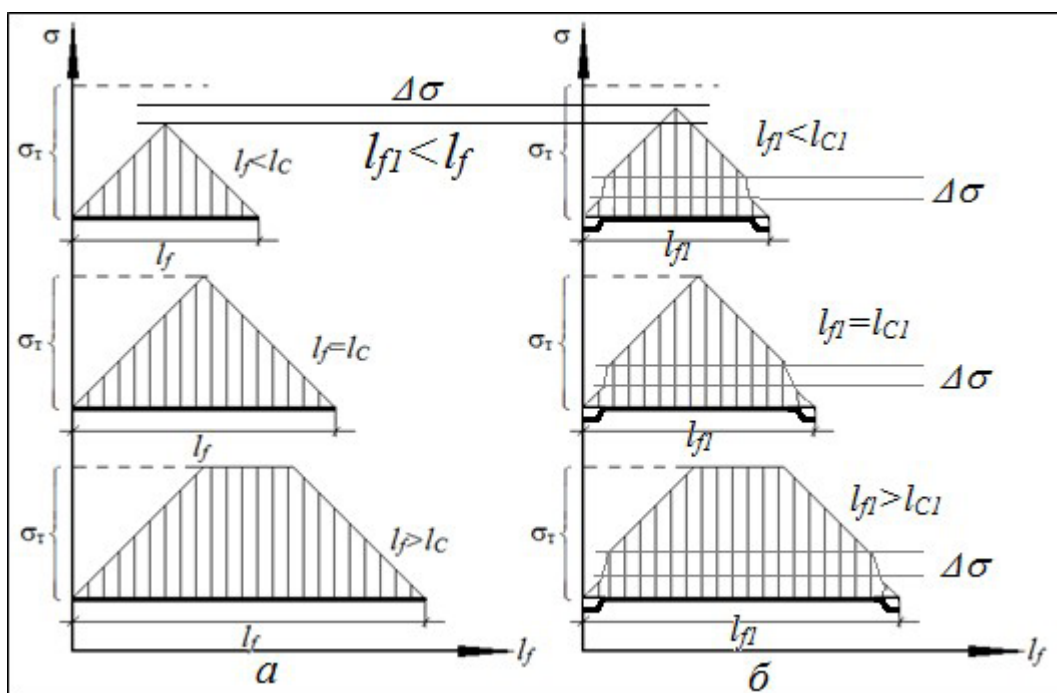


Рисунок 1 – Распределения напряжений по длине волокон разного типоразмера:
а – гладкая; б – анкерная
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Stress distributions along the length of fibers of different sizes:
a) smooth; b) anchor
Source: compiled by the authors.

В случае использования волокон малой длины ($l_f < l_c$) предел их прочности оказывается неисчерпанным, и потенциал таких волокон, как упрочнителя композита оказывается недоиспользованным. При этом технологически предпочтительно применять волокна как можно меньшей длины. Таким образом, представляется необходимым принимать меры по повышению прочности сцепления волокон с матрицей при одновременном сокращении их длины. Перспективным решением этой задачи является производство армирующих волокон анкерного профиля, например отрезка стальной проволоки с двумя двойными отгибами на концах. Теоретически такая форма фибры резко повышает прочность механического сцепления с матрицей, как показано на рисунке 1, б. Если напряжения распределяются вдоль гладких волокон равномерно, то в случае волокон с отгибами распределение напряжений происходит по более сложному закону. Благодаря этому фибра может воспринимать большие усилия, и ее длина может быть уменьшена.

Для количественной оценки данного эффекта проведены экспериментальные исследования, целью которых являлось определение влияния профиля стальной фибры и состава матрицы на их сцепление в дисперсно-армированном бетоне.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В ходе исследований применялись следующие сырьевые материалы:

- Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства *Heidelberg cement* (АО «Сланцевский цементный завод «Цесла»), нормальная плотность цементного теста = 30%.
- Кварцевый песок с модулем крупности $M_k = 2,3$, насыпная плотность $\rho_{\text{нас}} = 1450 \text{ кг/м}^3$; водопотребность = 8%.
- Фибра стальная гладкого профиля (рисунок 2), длина $l = 30 \text{ мм}$, диаметр $d = 0,3 \text{ мм}$.
- Фибра стальная анкерная (см. рисунок 2), длина $l = 30 \text{ мм}$, диаметр $d = 0,3 \text{ мм}$.
- Фибра стальная волнового профиля (см. рисунок 2), длина $l = 30 \text{ мм}$, диаметр $d = 0,3 \text{ мм}$.

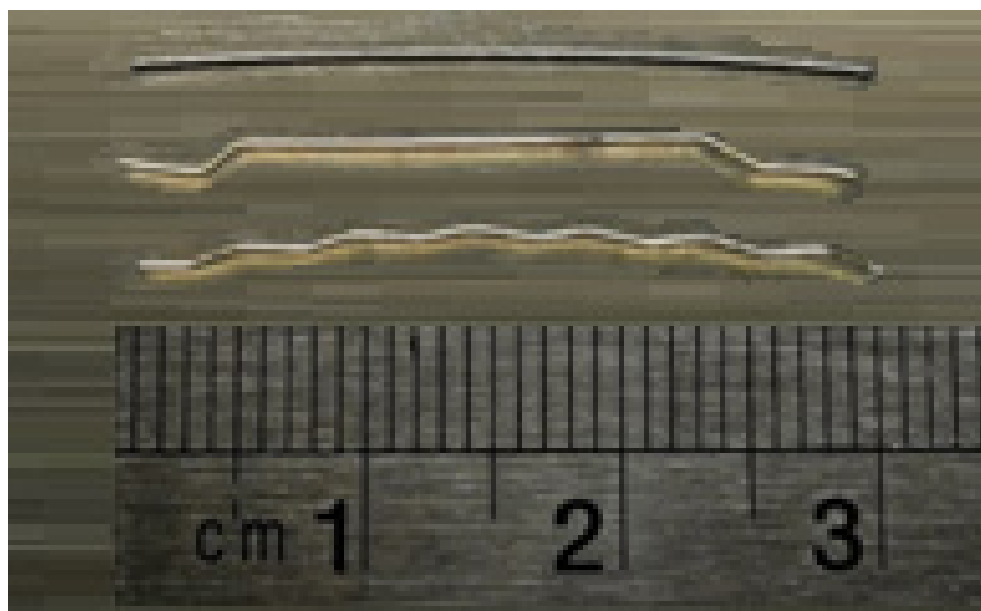


Рисунок 2 – Стальная фибра с разным геометрическим профилем
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Steel fiber with different geometric profile
Source: compiled by the authors.

Таблица 1
Результаты предела прочности на растяжение при изгибе
в зависимости от вида и объемного содержания стальной фибры
Источник: составлено авторами.

Table 1
Results of bending strength depending on the type and volume content of steel fibers
Source: compiled by the authors.

Объемное содержание стальной фибры, μ , %	Средняя прочность на растяжение при изгибе ($R_{изг}$, МПа) фибробетона с использованием		
	стальной фибры гладкого профиля	стальной фибры волнового профиля	стальной анкерной фибры
0	6,1	5,5	5,6
0,1	6,0	6,0	5,9
0,2	6,4	6,1	8,2
0,3	6,2	7,5	8,0
0,4	6,0	8,1	10,2
0,5	7,7	9,3	14,7
0,6	8,0	9,9	17,5
0,7	8,1	10,6	17,0
0,8	8,4	12,0	24,6
0,9	9,8	12,5	23,7
1,0	10,1	13,8	26,8

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения степени влияния геометрической формы стальных фибр – анкерной и волнового профиля – на характеристику прочности сцепления из цементного теста нормальной густоты были изготовлены 3 серии образцов-балок 4x4x16 см, армированных стальными волокнами одинаковой длины и диаметром, но разным геометрическим профилем. Предел армирования составлял 1,0% по объему, шаг армирования – 0,1%.

По истечении 28 сут изготовленные образцы-балки подвергались испытанию по определению прочности на растяжение при изгибе в соответствии с ГОСТ 10180 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным об-

разцам», полученные результаты представлены в таблице 1.

По ранее разработанному на кафедре ТСМиМ СПбГАСУ расчетно-экспериментальному методу [17] была определена характеристика прочности сцепления ($\varphi\tau$). Суть метода заключается в нахождении опытным путем такого минимального процента армирования цементного камня, до которого вводимые волокна практически не проявляют армирующего эффекта, но после которого наблюдается устойчивый рост прочности композита. При этом для исключения возможности неверного определения μ_{min} характеристика прочности сцепления фибр с матрицей определялась как среднее арифметическое нескольких результатов использования формулы (1).

$$(\varphi\tau) = \frac{R_{фц} - 3,5 \cdot R_{кз} \cdot \mu_{min} - R_{ук} (1 - 4,5 \cdot \mu_{min})}{2 \cdot \frac{l_{ф}}{d_{ф}} \cdot \mu_{min}}, \quad (1)$$

где (φ) – комплексный коэффициент, не требующий расшифровки при выполнении расчетов по уравнению прочности фиброцемента; $\mu_{\min}$ – объемная доля фибры, соответствующая такому процентному содержанию, после которого наблюдается устойчивое повышение прочности; $R_{\text{фц}}$ – прочность фиброцемента, соответствующая $\mu_{\min}$; $R_{\text{цк}}$ – прочность цементного камня; $R_{\text{кз}}$ – прочность контактной зоны ($R_{\text{кз}} = 1,4R_{\text{цк}}$); $l_{\text{ф}}$ – длина фибры; $d_{\text{ф}}$ – диаметр фибры.

Результаты определения характеристики прочности сцепления ($\varphi\tau$) в зависимости от профиля применяемой стальной фибры представлены в таблице 2.

Влияние механического сцепления стальной фибры за счет ее непрямолинейной геометрической формы составило: для волнового профиля ($\varphi\tau_{\text{мех}}^{\text{волн}}$) = 2,04 МПа, для анкерного профиля ($\varphi\tau_{\text{мех}}^{\text{анк}}$) = 8,27 МПа.

Для определения влияния состава матрицы композита на характеристику прочности сцепления были изготовлены 4 разных состава (таблица 3), имеющие разную матрицу: цементный камень, мелкозернистый бетон с соотношением цемента и кварцевого песка 1:1, 1:2, 1:3.

Расход воды подбирался с учетом нормальной густоты портландцемента и водопо-

требности песка. Все образцы армировались стальной анкерной фиброй, показавшей наибольшую эффективность, с максимальным содержанием волокон 1,0% по объему и шагом армирования 0,1 %.

Полученные в ходе исследования результаты прочности на растяжение при изгибе представлены в таблице 4.

Как видно из полученных результатов, в независимости от матрицы композита повышение расхода стальной анкерной фибры приводит к увеличению прочности на растяжение при изгибе. Однако динамика набора прочности армированных образцов, в зависимости от состава матрицы, разная, что связано с распределением волокон в матрице композита и объемным содержанием цементного теста. Так, например, у образцов из цементного теста нормальной густоты при объемном содержании стальной фибры до 0,45% прочность на растяжение при изгибе меньше, чем у образцов из цементно-песчаного раствора с соотношением цемента к кварцевому песку 1:3. Однако прочность на растяжение при изгибе образцов, изготовленных из цементного теста, в сравнении с образцами из цементно-песчаного раствора, становится больше при расходе волокон, превышающих 0,45 об. % (рисунок 3).

Таблица 2

Результаты характеристики прочности сцепления в зависимости от вида стальной фибры

Источник: составлено авторами.

Table 2

Results of adhesive strength characteristics depending on the type of steel fiber

Source: compiled by the authors.

Характеристика прочности сцепления фибры в цементном камне, ($\varphi\tau$), МПа		
стальная фибра, гладкая	стальная фибра, волнового профиля	стальная фибра, анкерная
1,67	3,71	9,94

Таблица 3

Составы матриц

Источник: составлено авторами.

Table 3

Matrix compositions

Source: compiled by the authors.

№ состава	Цементно-песчаное отношение	Водоцементное отношение	Расход материалов, кг/м³		
			портландцемент	кварцевый песок	вода
1	1:0	0,3	1640	–	492
2	1:1	0,38	935	935	355
3	1:2	0,46	645	1290	297
4	1:3	0,54	495	1485	267

Таблица 4

Результаты предела прочности на растяжение
при изгибе в зависимости от матрицы композита
и объемного содержания стальной фибры

Источник: составлено авторами.

Table 4

Results of bending strength depending on the matrix
of the composite and the volume content of steel fibers

Source: compiled by the authors.

Объемное содержание стальной анкерной фибры, μ , %	Матрица фибробетона			
	ЦК	Ц:П = 1:1	Ц:П = 1:2	Ц:П = 1:3
0	5,6	7,8	8,3	6,7
0,1	5,9	9,0	7,7	7,2
0,2	8,2	8,4	9,5	9,0
0,3	8,0	12,1	10,0	10,0
0,4	10,2	15,6	14,2	12,6
0,5	14,7	16,8	16,6	12,6
0,6	17,5	19,1	17,4	13,8
0,7	17,0	21,5	18,3	16,1
0,8	24,6	23,6	19,0	18,9
0,9	23,7	24,5	19,7	16,8
1,0	26,8	25,0	20,7	17,9

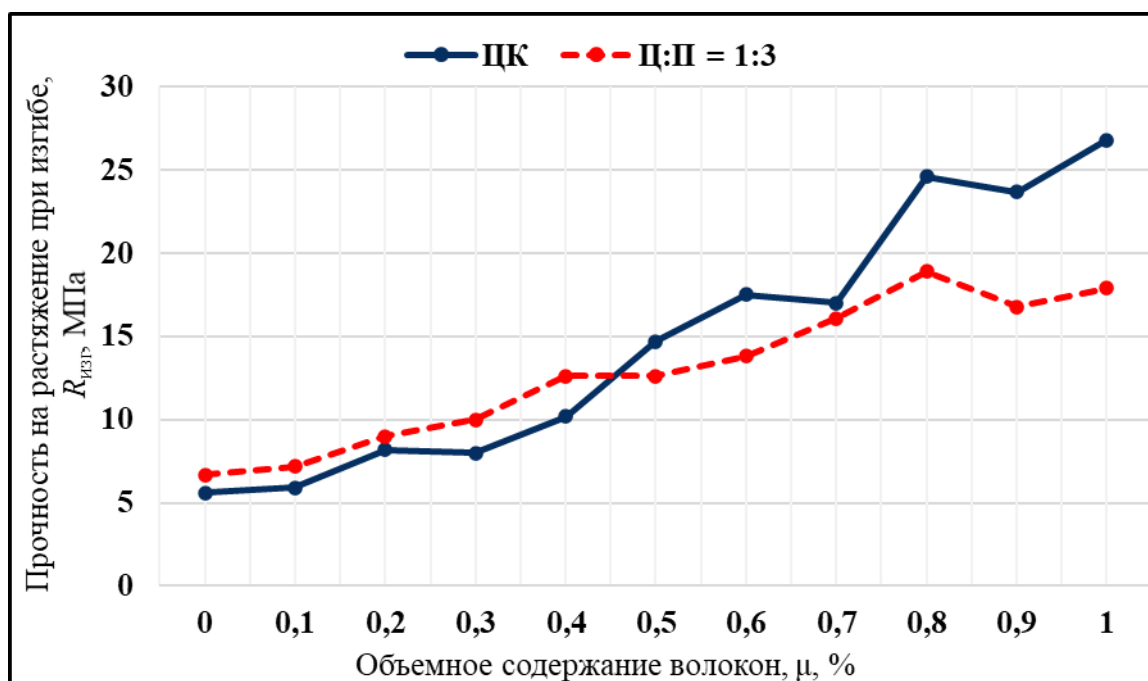


Рисунок 3 – График зависимости прочности на растяжение
при изгибе от объемного содержания фибры (ЦК и Ц:П = 1:3)

Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Graph of bending strength depending on fiber volume content
(Cement Stone and Cement: Sand = 1:3)

Source: compiled by the authors.

Результаты определения характеристики прочности сцепления стальной анкерной фибры $(\varphi\tau)_{\text{анк}}$ в зависимости от матрицы композита представлены в таблице 5.

Полученные результаты можно представить в виде графической зависимости характеристики прочности сцепления стальной анкерной фибры от доли цементного теста в общем объеме компонентов (рисунок 4).

Определяющим фактором, влияющим на характеристику прочности сцепления волокна, является объемная доля цементного теста в составе матрицы. Увеличение содержания цементного теста приводит к закономерному

увеличению сцепления стальной фибры (см. рисунок 3), что объясняется формированием более развитой контактной зоны и лучшим взаимодействием на границе раздела «фибра-матрица».

Данный график подтверждает зависимость величины прочности сцепления стального волокна от объемного содержания цементного теста. На основе полученных результатов получена эмпирическая зависимость для определения характеристики прочности сцепления стальной анкерной фибры с бетонной матрицей различного состава (2).

$$(\varphi\tau)_{\text{анк}} = -20,609 \cdot \text{ЦТ}^2 + 35,108 \cdot \text{ЦТ} - 5,5424, \quad (2)$$

где ЦТ – доля цементного теста в общем объеме.

Таблица 5

Результаты характеристики прочности сцепления в зависимости от матрицы композита

Источник: составлено авторами.

Table 5

The results of the adhesive strength depending on the matrix of the composite

Source: compiled by the authors.

	ЦК	Ц:П = 1:1	Ц:П = 1:2	Ц:П = 1:3
Характеристика прочности сцепления, $(\varphi\tau)_{\text{анк}}$, МПа	9,94	9,37	7,07	6,21
Объем цементного теста, $V_{\text{цт}}$, л	1000	651	500	423
Объем песка, $V_{\text{п}}$, л	0	349	500	577

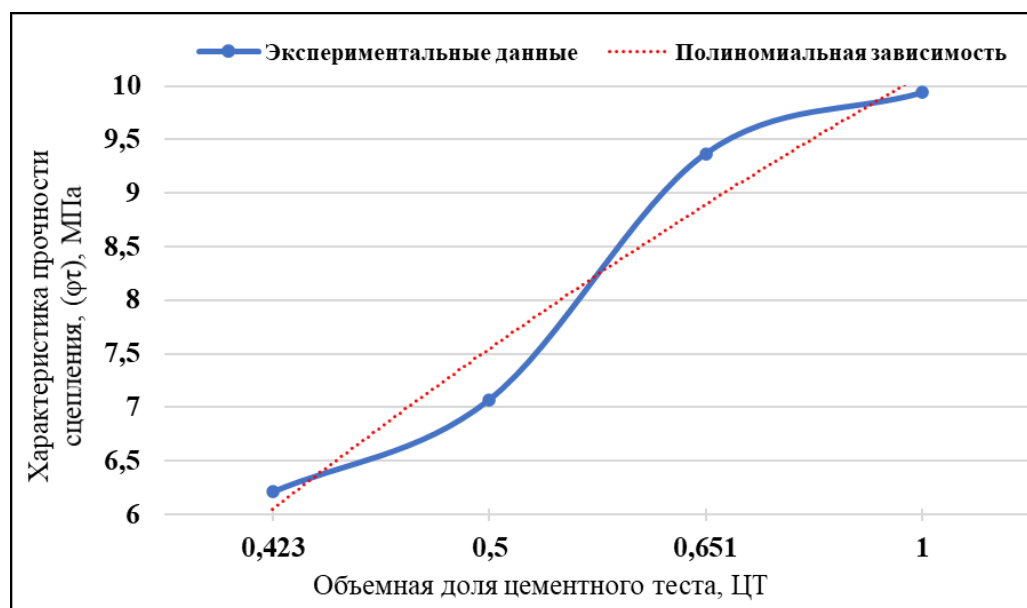


Рисунок 4 – Зависимость характеристики прочности сцепления стальной анкерной фибры от доли цементного теста в общем объеме компонентов

Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of the adhesive strength characteristics of steel anchor fibers on the proportion of cement paste in the total volume of components

Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований определено влияние геометрической формы стальной фибры на величину сцепления с бетонной матрицей, которое для фибры волнового профиля составило $(\varphi_{\text{мех}})_{\text{волн}} = 2,04$ МПа, а для анкерной фибры – $(\varphi_{\text{мех}})_{\text{анк}} = 8,27$ МПа. Кроме этого, доказана связь между величиной сцепления и объемной долей цементного теста.

Таким образом, полученные экспериментальные данные подтверждают теоретические положения о повышении эффективности дисперсного армирования путем применения анкерной фибры в сочетании с рационально подобранным составом бетонной матрицы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пухаренко Ю. В. Определение прочности сцепления армирующих волокон с матрицей в фибробетоне / Ю. В. Пухаренко, В. И. Морозов, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // Строительные материалы. 2020. № 3. С. 39–43.

2. Пухаренко Ю. В. Совершенствование метода определения величины сцепления армирующих волокон с матрицей в фибробетоне / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков, М. П. Кострикин // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году: Сб. науч. тр. РААСН. Т. 2. М.: Издательство АСВ, 2021. С. 208–216.

3. Pukharenko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I., Kostrikin M. P., Eshanzada Said Mujtaba Modelling the behavior of fiber-reinforced concrete with low-modulus fibers under load // «MATEC Web of Conferences» 329, 04002 (2020), ICMTMTE 2020.

4. 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.

5. Duy N. Ph Strength of concrete columns reinforced with glass fiber reinforced polymer / Duy N. Ph., Anh Vu. N., Hiep D. Vu., Anh N. M. T. // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 1 (101). P. 10108.

6. Saad M. M. G., Almsajdi S. A. A. S., Nankya H., Abdulwahed B. M. H. Steel and basalt fiber comparison in the flexural strength of conventional concrete // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2021. № 2-1 (53). pp. 69–73.

7. Shafei B., Kazemian M., Dopko M., Najimi M. State-of-the-art review of capabilities and limitations of polymer and glass fibers used for fiber-reinforced concrete // Materials. 2021. Т. 14. № 2. pp. 1–45.

8. 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.

9. 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.

10. Лесовик В. С. Композиты нового поколения для специальных сооружений / В. С. Лесовик, Р. С. Федюк // Строительные материалы. 2021. № 3. С. 9–17.

11. Кострикин М. П. Эффективность дисперсного полиармирования бетона низко модульными волокнами // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2(85). С. 128–133.

12. Хегай А. О. Экспериментальные исследования деформативных свойств сталефибробетона повышенных классов / А. О. Хегай, Н. М. Кирилин, Т. С. Хегай, О. Н. Хегай // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6(83). С. 77–82.

13. 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. Т. 243. P. 107506.

14. 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. Т. 266. P. 121173.

15. Holovata Z., Kirichenko D., Korneeva I., Neutov S., Vyhnaneets M. Experimental studies of fiber-reinforced concrete under axial tension // Materials Science Forum. 2021. Т. 1038. pp. 323–329.

16. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композиционные материалы. Механика и технология / Пер. с англ. С. Л. Баженов. М.: Техносфера, 2004. 408 с.

17. Пухаренко Ю. В. Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1(60). С. 172–176.

REFERENCES

1. Puharenko Yu. V., Morozov V. I., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. Opredelenie prochnosti scepheniya armiruyushchih volokon s matricej v fibrobetone [Determination of the adhesion strength of reinforcing fibers with a matrix in a fibrobeton]. *Stroitel'nye materialy*. 2020; 3: 39–43. (in Russ.)

2. Puharenko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I., Kostrikin M. P. Sovershenstvovanie metoda opredeleniya velichiny scepheniya armiruyushchih volokon s matricej v fibrobetone [Improving the Method of Determining the Adhesion of Reinforcing Fibers with a Matrix in Fibrobeton]. *Fundamental'nye, poiskovye i prikladnye issledovaniya Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nyh nauk po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noj otrasli Rossijskoj Federacii v 2020 godu: Sb. nauch.*

tr. RAASN. T. 2. Moscow, Izdatel'stvo ASV, 2021: 208–216. (in Russ.)

3. Pukharensko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I., Kostrikin M. P., Said Mujtaba Eshanzada Modelling the behavior of fiber-reinforced concrete with low-modulus fibers under load. «MATEC Web of Conferences» 329, 04002 (2020), ICMTMTE 2020.

4. Puharenko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. Sovershenstvovanie metodov opredeleniya silovykh i energeticheskikh harakteristik treshchinostojkosti fibrobetona [Improvement of Methods for Determination of Strength and Energy Characteristics of Fiber Concrete Crack Resistance]. *Vestnik MGSU*. 2019; T. 14. Vyp. 3: 301–310. (in Russ.)

5. Duy N. Ph., Anh Vu.N., Hiep D.Vu., Anh N.M.T. Strength of concrete columns reinforced with glass fiber reinforced polymer. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 1 (101): 10108.

6. Saad M. M. G., Almsajdi S. A. A. S., Nankya H., Abdulwahed B. M. H. Steel and basalt fiber comparison in the flexural strength of conventional concrete. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2021; 2-1 (53): 69–73.

7. Shafei B., Kazemian M., Dopko M., Najimi M. State-of-the-art review of capabilities and limitations of polymer and glass fibers used for fiber-reinforced concrete. *Materials*. 2021; T. 14. № 2:1–45.

8. Korotkih D. N. Zakonomernosti razrusheniya struktury vysokoprochnykh cementnykh 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*. 2012; Vyp. 26: 56–67. (in Russ.)

9. Korotkih D. N. Zakonomernosti razrusheniya struktury vysokoprochnykh cementnykh 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.)

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

11. Kostrikin M. P. Effektivnost' dispersnogo poliarminoaniya betona nizkomodul'nymi voloknami [Efficiency of dispersed polishing of concrete with low-modulus fibers]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2021; 2(85): 128–133. (in Russ.)

12. Hegaj A. O., Kirilin N. M., Hegaj T. S., Hegaj O. N. Eksperimental'nye issledovaniya deformativnykh svoystv stalefibrobetona povyshennykh klassov [Experimental studies of the deformative properties of elevated-grade steelefibrobeton]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2020; 6(83): 77–82. (in Russ.)

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

14. 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; T. 266:121173.

15. Holovata Z., Kirichenko D., Korneeva I., Neutov S., Vyhnaneys M. Experimental studies of fiber-reinforced concrete under axial tension. *Materials Science Forum*. 2021; T. 1038: 323–329.

16. Mettyuz F. Rolings R. Kompozicionnie materialy. *Mehanika i tehnologiya [Composites. Mechanics and technology]*. Per. s angl. S.L. Bajenov. Moscow, Tehnosfera, 2004:408.

17. Puharenko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. Opredelenie vkladu fibry v formirovaniye prochnosti stalefibrobetona [Determining the contribution of fiber to the formation of the strength of steel fiber concrete]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2017; 1(60):172–176. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

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

Пантелеев Д. А. Проведение эксперимента по определению влияния геометрической формы стальных фибр на характеристику прочности сцепления.

Жаворонков М. И. Проведение эксперимента по определению влияния состава матрицы композита на характеристику прочности сцепления.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Yury V. Pukharensko. Statement of the study area, formulation of goals and objectives.

Dmitrii A. Panteleev. Conducting an experiment to determine the influence of the geometric shape of steel fibers on the characteristics of the adhesion strength.

Mikhail I. Zhavoronkov. Conducting an experiment to determine the effect of the composition of the matrix of the composite on the characteristics of the adhesion strength.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пухаренко Юрий Владимирович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой ТСММ; НИИ-ИСФ РААСН – главный научный сотрудник.

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yury V. Pukharensko – Dr. of Sci., Professor, Head of the Building Materials Technology and Metrology Department, NIISF RAASN (Chief Researcher).

Dmitrii A. Panteleev – Cand. of Sci., Associate Professor of the Building Materials Technology and Metrology Department.

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