

Трещиностойкость бетона со стеклопластиковой и стальной фиброй

И.Д. Сизяков

Национальный Исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В качестве аналога стальным компонентам в железобетонных или сталефибробетонных конструкциях приводится объемно-дисперсное армирование из композитной фибры. В работе представлены результаты сравнительного анализа стеклопластиковой и стальной анкерной фибры, композитные волокна, состоящие из стекловолокна и эпоксидной смолы. Применялись следующие методы исследования: определение остаточной прочности при растяжении фибробетона, испытания проводились на рядовых бетонах В30. По результатам испытаний получены диаграммы напряжно-деформированного состояния при определении остаточной прочности. По выводам в работе отмечено, что прочность сцепления фибры с бетоном из стеклопластика связана с геометрическими параметрами, в том числе, с конфигурацией продольного и поперечного сечения волокна, а также отмечены высокие показатели трещиностойкости фибробетона на стеклопластиковой фибре, соразмерные стальной фибре, получены составы фибробетона со стеклопластиковой фиброй от 1,6% до 0,8% по объему, соответствующие классу по трещиностойкости от $V_{ft3} 2,5b$ до бс.

Ключевые слова: фибра, стеклопластик, вырыв, трещиностойкость, фибробетон, композит, стеклокомпозит, сравнение, прочность, волокно.

Введение

Композитные материалы все чаще применяются в строительной сфере в качестве упрочняющих и армирующих элементов [1-3]. Объемно-дисперсное армирование бетона композитной фиброй [4,5] пока является новым направлением по сравнению с широко распространенным сталефибробетоном [6-7]. Эффективность композитной фибры зависит от сырья, формы и размера единичного изделия, а также взаимного расположения компонентов друг относительно друга. Именно за счет оптимального взаимного расположения отдельных компонентов и геометрических размеров, возможно получение композитной фибры, обеспечивающей существенное повышение физико-механических и эксплуатационных характеристик бетонов.

В работе были исследованы три вида высокомодульной стеклопластиковой фибры различных геометрических размеров, по характеристикам близкой к стальной фибре (таблица 1).

Материалы и методы исследования

Для испытаний были использованы три вида стеклопластиковой фибры и один вид анкерной стальной фибры в качестве контрольного. Размеры и фотографии используемой фибры приведены на рисунке 1.

Таблица № 1

Сравнительные характеристики фибры

Материал фибры	ρ , (г/см ³)	R_t , (МПа)	$R_{сцеп}$, (МПа)	E_b , (ГПа)	Относительное удлинение, (%)
Стальная	7,85	800 - 3150	5–15	210	3–4
Стеклопластиковая	2,5	1269,9	8–10	31,9	4,2

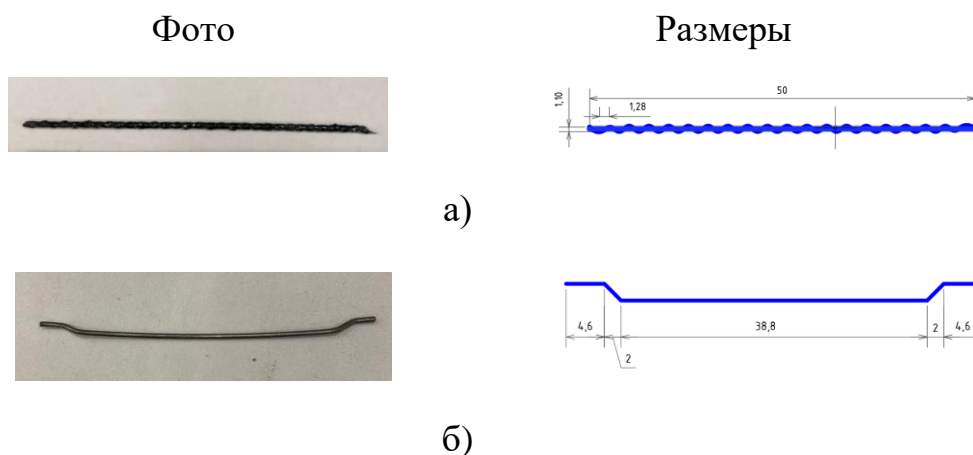


Рис. 1 Фибра, применяемая в испытаниях; а) композитная фибра прямая (Ф1); б) стальная анкерная фибра (СФ)

Размеры и плотность композитной фибры, определенные для каждого вида по 5 образцам, приведены в таблице 2.

Физико-механические характеристики стеклопластиковой фибры, определенные по 5 образцам. Композитная фибра состоит из эпоксидной смолы 16,2%, стекловолоконного ровинга 73,9% и обмоточной нити 9,9%.

Таблица № 2

Размеры и плотность композитной фибры



№	Тип фибры	Длина, мм	Диаметр, мм	Длина отгиба, мм	Плотность, г/см ³
1	Ф1	52,5	1,10	-	2,41
2	СФ	50,0	0,80	6,6	7,85

В испытания использовался бетона класса В30, состоящий из цемента ЦЕМ II 42.5Н, песка с модулем крупности 2,6 и гранитным щебнем фракции 10–5, а также пластификатор MasterGlenium115. Расход компонентов на 1 м³ в кг: Ц=330, В=180, П=850, К=1150, Пл=2,3.

Трещиностойкость фибробетона определялась по методике оценки остаточной прочности на растяжение по СП 297.1325800.2017. Для испытаний на вырыв фибры из бетона и определение остаточной прочности фибробетона на растяжение, определение кубковой прочности применялось следующее оборудование: весы GP-32К, пресс Controls 50-C8455, испытательная машина Instron 3382.

Эксперименты и обсуждение результатов

Испытание на трещиностойкость является ключевым показателем качества фибробетона [8–10]. Трещиностойкость бетонов определялась на образцах размером $100 \times 100 \times 400$ мм с пропилом в средней части глубиной 17 мм, прочность бетона на сжатие 37,5 МПа. В работах [11,12] представлены испытания на трещиностойкость фибробетонов со стальной фиброй. Сравнение различных видов и типов фибр по данной характеристике описаны в статьях [13,14].

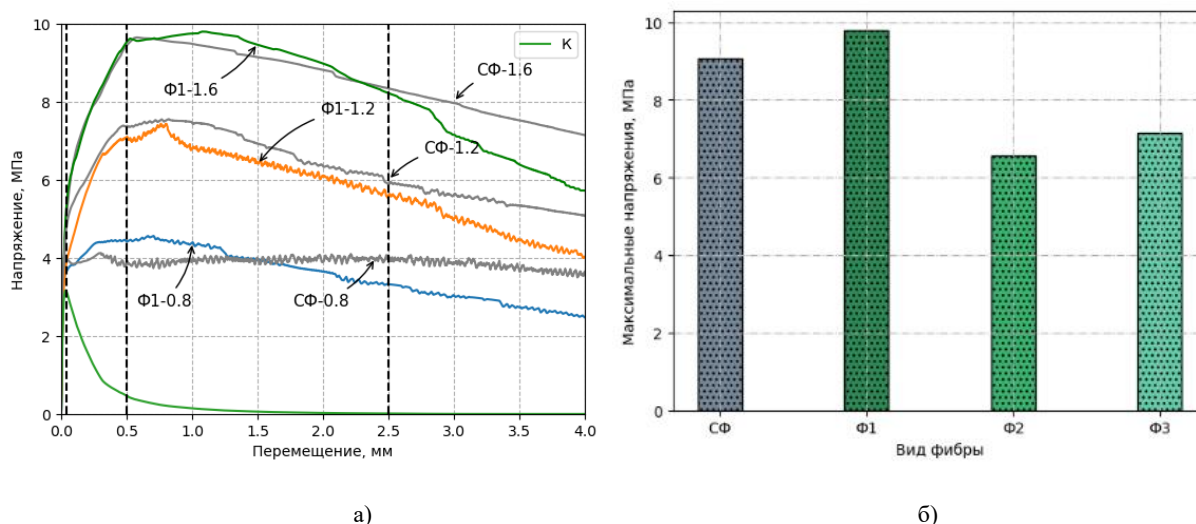


Рис. 2 Диаграммы по результатам испытаний а) нагрузка-ширина раскрытие трещины; б) Экстремальные значения остаточной прочности бетона при растяжении [15]

В работе были проведены сравнительные испытания по трещиностойкости сталефибробетона и фибробетона с прямой стеклопластиковой фиброй. Результаты сравнительных испытаний приведены в таблице 3 и рисунке 2.

На основании результатов первого этапа испытаний, описанных в статье [15] установлено, что прямая стеклопластиковая фибра с навивкой (Ф1) является наиболее эффективной и по полученным характеристикам фибробетонов сопоставима со стальной.

Таблица № 3

Класс по трещиностойкости фибробетона в зависимости от концентрации

№	Маркировка	Концентрация, по объему %	R_{FeI} , МПа	$R_{0,5}$, МПа	$R_{2,5}$, МПа	$R_{fbt2,n}$ МПа	$R_{fbt3,n}$ МПа	$R_{fbt,n}$ МПа	B_{ft3}
1	Ф1-1,6	1,6	5,58	9,87	8,61	8,3	6,3	5,0	<u>6c</u>
2			5,31	8,67	6,92				
3			6,14	10,08	9,15				
4	Ф1-1,2	1,2	6,39	4,20	4,64	5,6	3,6	2,6	<u>3,5b</u>
5			8,11	6,40	4,49				
6			6,79	6,21	3,00				
7	Ф1-0,8	0,8	4,97	3,76	3,98	3,6	2,7	3,3	<u>2,5b</u>
8			3,99	2,95	3,58				
9			4,29	3,27	3,58				
10	СФ-1,6	1,6	9,91	8,59	5,85	7,8	6,8	3,4	<u>6,5c</u>
11			10,18	9,13	7,8				
12			8,29	7,3	4,6				
13	СФ-1,2	1,2	7,22	6,05	4,9	5,8	4,1	3,7	<u>4b</u>
14			6,48	4,72	4,27				
15			8,42	6,88	5,79				
16	СФ-0,8	0,8	4,51	4,64	4,38	2,3	2,0	3,2	<u>2d</u>
17			4,39	4,80	3,97				
18			2,80	2,57	3,49				

В результате проведенных испытаний установлено, что трещиностойкость бетона со стальной и стеклопластиковой фиброй при их содержании от 0,8 до 1,6 % по объему практически идентичны.

Экономический эффект от применения стеклопластиковой фибры заключается в снижении затрат и стоимости транспортировки фибры, т.к. расход по массе стеклопластиковой фибры в бетоне в три раза ниже по сравнению со стальной фиброй. Стоимость стальной фибры составляет 130 тыс. руб. за 1 тонну, а предварительная стоимость стеклокомпозитной фибры составляет 326–372 тыс. руб. за тонну.

Заключение

По результатам исследования сделаны следующие выводы:

1. Проведены испытания по определению трещиностойкости фибробетона на стеклопластиковой фибре. Фибра Ф1 испытанная в данной

работе, показала высокий результат по экстремальным значениям остаточной прочности при растяжении на 36,3% выше, чем у анкерной фибры и на 50% выше, чему у волнистой фибры, это может быть связано с более стабильной связью с бетонной матрицей [15].

2. В сравнительном анализе стальной фибры со стеклопластиковой последняя показала немного более высокий результат по влиянию на остаточную прочность при растяжении фибробетона, так сталефибробетон при концентрации фибры 1,6%, 1,2%, 0,8% по объему R_{max} равны, соответственно, 9,71 МПа, 7,55 МПа, 4,12 МПа, а бетон со стеклопластиковой фиброй имеет максимальное значение при определении остаточной прочности на растяжение при тех же концентрациях $R_{max}=9,88$ МПа, 7,44 МПа, 4,56 МПа.

3. Применение стеклопластиковой фибры целесообразно с точки зрения экономичности при транспортировании её до бетонных заводов в силу меньшей плотности в 3 раза, чем у стальной.

Литература

1. Рабинович Ф. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Москва: АСВ, 2011. 642 с.
2. Nurtdinov M., Solovyev V., Panchenko A. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2016. Vol. 86. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20168604026>.
3. Фролов Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции. Москва: Стройиздат, 1980. 104 с.
4. Вавилова М.И., Кавун Н.С. Свойства и особенности армирующих стеклянных наполнителей, используемых для изготовления конструкционных стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. Т. 3. С. 33–37.

5. Нуртдинов М.Р., Бурьянов А.Ф., Соловьёв В.Г. Повышение эффективности применения композитной стеклопластиковой фибры в бетонах // Строительные материалы, 2017. Т. 4. С. 68–71.

6. Зайцев Д.В. Термические изменения сталефибробетонов с различными параметрами дисперсного армирования после воздействия высоких температур // Инженерный вестник Дона, 2021, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6945.

7. Маилян, Л.Р., Налимова, А.В., Маилян, А.Л., Айвазян, Э.С. Челночная технология изготовления фибробетона с агрегированным распределением фибр и его конструктивные свойства // Инженерный вестник Дона, 2011, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/714.

8. Gao D., Luo F., Yan Y., Tang J., Yang L. Experimental investigation on the flexural performance and damage process of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete // Structures. Elsevier, 2023. Vol. 51. pp. 1205–1218.

9. Shi F., Pham T., Tuladhar R., Deng Z., Yin S., Hao H. Comparative performance analysis of ground slabs and beams reinforced with macro polypropylene fibre, steel fibre, and steel mesh // Structures. Elsevier, 2023. Vol. 56 URL: doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104920.

10. Liu J., Zang S., Yang F., Hai R., Yan Y. Fracture properties of steel fibre reinforced high-volume fly ash self-compacting concrete // Case Studies in Construction Materials. Elsevier, 2023. Vol. 18 URL: doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02110.

11. Fu C., Ye H., Wang K., Zhu K., He C. Evolution of mechanical properties of steel fiber-reinforced rubberized concrete (FR-RC) // Compos B Eng. Elsevier, 2019. Vol. 160. pp. 158–166.

12. Gondokusumo G.S., Venkateshwaran A., Li S., Liew R. Residual flexural tensile strength of normal-weight and light-weight steel fibre-reinforced

concrete at elevated temperatures // Constr Build Mater. Elsevier, 2023. Vol. 367
URL: doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.130221.

13. Pająk M., Ponikiewski T. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers // Constr Build Mater. Elsevier, 2013. Vol. 47. pp. 397–408.

14. Bhosale A. Rasheed A., Prakash S., Raju, G. A study on the efficiency of steel vs. synthetic vs. hybrid fibers on fracture behavior of concrete in flexure using acoustic emission // Constr Build Mater. Elsevier, 2019. Vol. 199. pp. 256–268.

15. Соловьев В. Г., Сизяков И. Д. Физико-механические свойства бетонов со стеклопластиковой фиброй // Строительное материаловедение: настоящее и будущее: Сборник материалов III Всероссийской научной конференции, посвящённой девяностолетию кафедры Строительного материаловедения. М: НИУ МГСУ, 2023. С. 278-283.

References

1. Rabinovich F. Kompozity na osnove dispersno-armirovannyh betonov [Composites based on disperse-reinforced concretes]. Moskva, 2011. 642 p.

2. Nurtdinov M., Solovyev V., Panchenko A. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2016. Vol. 86. URL: doi.org/10.1051/matecconf/20168604026.

3. Frolov N.P. Stekloplastikovaja armatura i stekloplastbetonnye konstrukcii [Fiberglass rebar and glass GRP concrete structures]. Moskva, 1980. 104 p.

4. Vavilova M.I., Kavun N.S. Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. Vol. 3. pp. 33–37.

5. Nurtdinov M.R., Bur'janov A.F., Solov'jov V.G. Stroitel'nye materialy, 2017. Vol. 4. pp. 68–71.

6. Zajcev D.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6945.



7. Mailjan, L.R., Nalimova, A.V., Mailjan, A.L., Ajvazjan, Je.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2011, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/714.
8. Gao D., Luo F., Yan Y., Tang J., Yang L. Structures. Elsevier, 2023. Vol. 51. pp. 1205–1218.
9. Shi F., Pham T., Tuladhar R., Deng Z., Yin S., Hao H. Structures. Elsevier, 2023. Vol. 56. URL: doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104920.
10. Liu J., Zang S., Yang F., Hai R., Yan Y. Case Studies in Construction Materials. Elsevier, 2023. Vol. 18. URL: doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02110.
11. Fu C., Ye H., Wang K., Zhu K., He C. Compos B Eng. Elsevier, 2019. Vol. 160. pp. 158–166.
12. Gondokusumo G.S., Venkateshwaran A., Li S., Liew R. Constr Build Mater. Elsevier, 2023. Vol. 367. URL: doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.130221.
13. Pająk M., Ponikiewski T. Constr Build Mater. Elsevier, 2013. Vol. 47. pp. 397–408.
14. Bhosale A. Rasheed A., Prakash S., Raju, G. Constr Build Mater. Elsevier, 2019. Vol. 199. pp. 256–268.
15. Solov'ev V. G., Sizyakov I. D. Stroitel'noe materialovedenie: nastojashhee i budushhee : Sbornik materialov III Vserossijskoj nauchnoj konferencii, posvjashhjonnoj devjanostoletiju kafedry Stroitel'nogo materialovedenija (Proc. Constructions materials science: present and future). Moscow, 2023. pp. 278-283.

Дата поступления: 11.03.2024

Дата публикации: 29.04.2024