УДК 666.982

© А. О. Хегай, канд. техн. наук, доцент

© Н. М. Кирилин, магистрант

© Е. О. Хегай, магистрант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: lhegai@mail.ru, ht1me179@gmail.com,
genehegay1235@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-1-56-60

© А. О. Khegai, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© N. M. Kirilin, undergraduate

© E. O. Khegai, undergraduate

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: lhegai@mail.ru, ht1me179@gmail.com,
genehegay1235@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ПОВЫШЕННЫХ КЛАССОВ

EXPERIMENTAL STUDY OF STRENGTH PROPERTIES OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE OF HIGHER CLASSES

Рассмотрены прочностные и деформативные свойства высокопрочного сталефибробетона с различными процентами армирования фиброй. Разработан состав высокопрочного сталефибробетона с применением стальной анкерной фибры и высокопрочной бетонной матрицы (B60), полученной с использованием современных добавок отечественного производства. Создана и проведена программа испытаний, направленная на экспериментальное определение предела прочности, модуля упругости, модуля деформации и предельной сжимаемости высокопрочного сталефибробетона.

Ключевые слова: сталефибробетон, фибробетон, фибра, прочностные свойства, деформативные свойства, эксперимент.

The paper presents the results of the study of strength and stress-strain properties of high-strength steel fiber reinforced concrete with various rates of fiber reinforcement. There has been developed a high-strength fiber reinforced concrete structure with application of steel anchor fiber and high-strength concrete matrix (B60), which has been obtained using modern additives of domestic production. A program of tests aimed at experimental determination of the failure limit, the elasticity module, the module of deformation and the limit compressibility of high-strength fiber reinforced concrete has been developed and carried out.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, fiber reinforced concrete, fiber, strength properties, stress-strain properties, experiment.

Актуальность темы обусловлена потребностью современного строительства в улучшении физико-механических и эксплуатационных характеристик строительных конструкций при одновременном их удешевлении. Возникает необходимость в теоретическом обосновании и разработке методов расчета и испытаний конструкций с применением перспективных строительных материалов.

Таким материалом является фибробетон. Его нельзя назвать новым материалом, так как первые труды на эту тему датируются началом XX в. [1]. Однако, несмотря на более чем столетнюю историю исследования данного материала, многие темы, в том числе связанные с проектированием сжатых конструкций из фибробетона,

являются недостаточно проработанными. В особенности это касается применения стальной фибры совместно с бетонами высоких классов.

Для изучения данного вопроса была разработана программа испытаний сталефибробетонных образцов повышенных классов при простом одноосном сжатии.

Для проведения испытаний в лаборатории СПбГАСУ было изготовлено 42 образца в виде призм размерами 100×100×400 мм. При изготовлении образцов из высокопрочного сталефибробетона использовалась бетонная матрица класса B60, армирование выполнялось стальной анкерной фиброй ФСВ-А-0,30/30 с временным сопротивлением 1200 МПа. Для сравнения характеристик армированного и неармированного

бетона было изготовлено шесть бетонных образцов класса В60.

В соответствии с Рекомендациями по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов¹ и [2] были разработаны составы фибробетонной смеси с процентами армирования: 1, 1,5, 2 %. При получении бетона класса В30 для регулирования подвижности смеси используется поликарбоксилатный суперпластификатор «Макромер П-163» производства НПП «Макромер» им. В. С. Лебедева. Для получения высокопрочного бетона использовались добавки «Полипласт-3МБ» и «Реламикс Т-2» производства «Полипласт Северо-Запад». «Полипласт-3МБ» — органоминеральная добавка, состоящая из суперпластификатора и мелкодисперсного компонента. Данная добавка позволяет получить бетонную смесь большей прочности при постоянном водоцементном отношении. Благодаря совместному действию мелкодисперсного компонента и суперпластификатора происходит дополнительное уплотнение бетонной смеси, что способствует улучшению его водонепроницаемости и коррозионной стойкости. «Реламикс Т-2» представляет собой суперпластификатор и ускоритель набора прочности. Совместно с тепловой обработкой бетонной смеси применение данной добавки позволило получить бетон большей прочности при меньших сроках твердения. В табл. 1 представлены составы смесей.

Испытания образцов-призм производились на испытательной машине с пределом нагружения 2500 кН. На предварительно отшлифованные образцы по всем четырем граням устанавливались тензометры Аистова. Испытания производились ступенчатым нагружением с выдержкой под нагрузкой 1 мин.

Так как образцы испытывались после тепло-влажностной обработки, без дальнейшей выдержки в условиях естественной влажности, то для определения прочности образцов в возрасте 28 суток полученная фактическая прочность умножалась на эмпирический коэффициент 1,2. Прочность образцов, для приготовления которых использовался ускоритель твердения, умножалась на коэффициент 1,1.

В результате были подтверждены данные других исследователей [3–5]: введение дисперсной стальной арматуры сильно меняло характер разрушения образцов. Разрушение происходило постепенно. При величине нагрузки $0,7-0,8P_{\text{разр}}$ (где $P_{\text{разр}}$ — разрушающая нагрузка) невооруженным взглядом можно было заметить трещины у опорных граней элемента. Это обусловлено технологическими особенностями изготовления образцов: зоны у граней часто оказываются недоармированными.

По мере увеличения нагрузки можно было услышать характерный треск, возникающий из-за выдергивания фибры из тела бетона.

При достижении разрушающей нагрузки происходил «хлопок» и образовывалась магистральная трещина. Характер магистральной трещины — наклонный. При этом в середине образца трещина часто «ветвилась» на несколько меньших трещин, что сопровождалось скалыванием бетона в этом месте.

После достижения разрушающей нагрузки в работу активно включалась стальная фибра, благодаря чему образец оставался целым. Картина разрушения образцов с разным процентом содержания фибры менялась незначительно.

Таблица 1

Составы смесей

Составляющая смеси	Расход на 1 м ³ фибробетона			Ед. изм.
	В30	В60	В60*	
Цемент (Цем I 42,5Н «Евроцемент»)	500	1000	1000	кг
Песок	1500	1000	1000	кг
Вода	240	300	300	л
«Макромер П-163» (пластификатор)	2,75	4,85	–	л
«Реламикс Т-2» (суперпластификатор и ускоритель твердения)	–	–	6	кг
«Полипласт 3МБ» (высокодисперсная добавка)	–	–	150	кг
Фибра стальная анкерная ФСВ-А-0,30/30:				
1 %	78,5			кг
1,5 %	117,8			кг
2 %	157			кг

¹ Методическое пособие. Рекомендации по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов. М.: НИИЖБ, 2016. 100 с.

Это отличалось от испытания неармированных бетонных призм, у которых разрушение имело хрупкий характер и происходило мгновенно, без каких-либо видимых предпосылок. Образовывалось несколько вертикальных трещин, приобретающих наклонный характер ближе к опорным граням элемента. Общие виды испытанных образцов после разрушения представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 и 2 видно, что конструкции из фибробетона сохраняют свою целостность при разрушении, то есть введение фибры в бетонную матрицу позволяет побороть один из главных недостатков бетона — хрупкость его разрушения. Это качество обуславливает применение высокопрочного сталефибробетона в конструкциях с повышенными требованиями к безопасности.

Существует два возможных вида разрушения фибробетона [6]: из-за обрыва некоторого количества фибр и выдергивания остальных, и из-за выдергивания условно всех фибр. Вид разрушения фибробетона напрямую зависит от сцепления фибры с бетонной матрицей: при недостаточном сцеплении наблюдается выдергивание фибр из матрицы. Следовательно, для максимального использования прочностных свойств фибры требуется обеспечить ее надлежащее сцепление с бетоном. Это реализуется при применении бетонов высоких классов прочности. Высокопрочные бетоны обладают большей плотностью, чем обыкновенные бетоны, что позволяет достичь большего сцепления с матрицей, и, следовательно, фибра используется более эффективно. На рис. 3 представлено разрушение фибробетона от частичного разрыва фибр.

Введение фибры повысило прочностные характеристики бетона. Результаты испытаний образцов на прочность при сжатии представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, введение стальной фибры в высокопрочную бетонную матрицу позволило получить незначительный прирост приростной прочности.

Коэффициент перехода от кубиковой прочности к призмочной в среднем для фибробетона составил 0,8.

Максимальное значение прироста прочности было достигнуто при проценте армирования, равном 1,5 %. При дальнейшем увеличении

Рис. 1. Общий вид разрушенных бетонных образцов

Рис. 2. Общий вид разрушенных фибробетонных образцов

Рис. 3. Магистральная трещина

Таблица 2

Результаты испытаний образцов призм на прочность при сжатии

Бетон В60, процент армирования	Призменная прочность по сериям R_b , МПа	Начальный модуль упругости $E_{fb0} \cdot 10^3$, МПа	Модуль деформации $E_{fb} \cdot 10^3$, МПа	Предельная сжимаемость ϵ
0 %	63,0	27 076,81	23 073,92	3,178
	73,6	27 072,23	22 474,78	3,520
	71,0	26 442,09	23 020,64	3,351
Среднее	69,2	26 863,71	22 856,45	3,350
1 %	75,5	23 442,96	23 871,36	4,153
	73,6	30 674,75	27 161,99	3,647
	75,4	28 425,51	24 630,80	3,820
Среднее	74,8	27 514,41	25 221,39	3,873
1,5 %	73,0	29 230,44	24 913,45	3,583
	80,0	28 204,21	23 610,70	4,031
	83,1	28 172,88	22 847,78	4,244
Среднее	78,7	28 535,85	23 790,64	3,952
2 %	76,0	30 894,04	23 768,91	4,169
	74,0	27 938,04	23 323,69	3,935
Среднее	75,0	29 416,04	23 546,30	4,052

объемного содержания фибры прочностные характеристики образцов падают. Это может быть связано с перенасыщением бетонной матрицы фиброй, в связи с чем она получает некоторую способность к расслаиванию.

В табл. 3 представлено сравнение теоретической призменной прочности фибробетона по СП 360.1325800.2017 «Конструкции сталефибробетонные» с результатами экспериментов.

Как видно из табл. 3, результаты эксперимента хорошо коррелируют с теоретическими значениями.

Согласно табл. 2, начальный модуль упругости изменяется незначительно. Малые по сравнению с бетоном рядовых классов приращения модуля упругости можно объяснить большим модулем упругости самой бетонной матрицы В60, из-за чего введение высокомодульных стальных волокон оказывает меньшее влияние. С повышением содержания фибры модуль упругости увеличивается.

Начальный модуль упругости отвечает лишь начальному этапу загрузки. В предельном состоянии, когда образовались трещины, модуль деформации меньше, чем начальный модуль упругости, и именно он отвечает за перераспределение усилий. Так, в СП 52-103-2007 при расчете железобетонных конструкций рекомен-

Таблица 3

Отклонения теоретических значений призменной прочности от экспериментальных

Серия	Фактическая призменная прочность	Призменная прочность по СП 52.104.2006*
В60, 1 %	74,80	77,60
Δ , %		3,74
В60, 1,5 %	78,70	81,18
Δ , %		3,15
В60, 2 %	75,00	84,44
Δ , %		12,59

дуется принимать модуль упругости материала с понижающим коэффициентом 0,6 для сжатых вертикальных элементов.

Результаты испытаний показали, что в среднем снижение модуля деформаций составляет для процента армирования 1 % — 0,92; 1,5 % — 0,83, 2 % — 0,8.

Следует также отметить, что с увеличением процента фибрового армирования увеличивается и предельная сжимаемость материала до 20 %. Для бетонов средних классов ее прирост достигал 30–40 %.

Библиографический список

1. Некрасов В. П. Новейшие приемы и задачи железобетонной техники // Зодчий. 1908. № 19. С. 173–174.
2. Баженов Ю. М. Технология бетона. М.: АСВ, 2002. 499 с.
3. Воронцова Н. С. Экспериментальные исследования косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 4 (63). С. 66–71.
4. Евдокимова Т. С., Морозов В. И. Экспериментальные исследования кососжимаемых железобетонных и фиброжелезобетонных элементов // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6 (53). С. 37–40.
5. Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Диаграммы деформирования цементных композитов, армированных стальной проволоочной фиброй // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 2. С. 143–147.
6. Пухаренко Ю. В., Голубев В. Ю., Хегай А. О. Об оценке трещиностойкости сталефибробетона ультразвуковым методом // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 9. С. 50–51.

References

1. Nekrasov V. P. *Noveyshie priemy i zadachi zhelezobetonnoy tekhniki* [The latest methods and objectives of concrete technology]. *Zodchiy – Architect*, 1908, no. 19, pp. 173–174.

2. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betona* [Technology of concrete]. Moscow, ASV Publ., 2002, 499 p.

3. Vorontsova N. S. *Ehksperimental'nye issledovaniya kosoizgibaemykh fibrozhelezobetonnykh ehlementov* [Experimental investigations of fiber reinforced concrete members subjected to biaxial bending]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 4 (63), pp. 66–71.

4. Evdokimova T. S., Morozov V. I. *Ehksperimental'nye issledovaniya kososzhimaemykh zhelezobetonnykh i fibrozhelezobetonnykh ehlementov* [Experimental investigations of reinforced concrete and fiber reinforced concrete members under biaxial compression]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 6 (53), pp. 37–40.

5. Pukharenko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. *Diagrammy deformirovaniya tsementnykh kompozitov, armirovannykh stal'noy provolochnoy fibroy* [Deformation diagrams of cement composites reinforced with steel fiber]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo – Academia. Architecture and construction*, 2018, no. 2, pp. 143–147.

6. Pukharenko Yu. V., Golubev V. Yu., Khagai A. O. *Ob otsenke treshchinostoykosti stalefibrobetona ul'trazvukovym metodom* [On evaluating the cracking resistance of steel fiber reinforced concrete by the ultrasonic method]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2009, no. 9, pp. 50–51.