УДК 666.982

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

© Н. М. Кирилин, магистрант

© Т. С. Хегай, канд. техн. наук, доцент

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: lhagai@mail.ru, ht1me179@gmail.com, ts_khegai@mail.ru

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

(Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия)

E-mail: khegaion@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-77-82

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

© N. M. Kirilin, undergraduate

© T. S. Khegai, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: lhagai@mail.ru, ht1me179@gmail.com, ts_khegai@mail.ru

© O. N. Khegai, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Katanov Khakass State University, Abakan, Russia)

E-mail: khegaion@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ПОВЫШЕННЫХ КЛАССОВ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN PROPERTIES OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE OF THE HIGHER CLASSES

Важнейшей характеристикой сталефибробетона является начальный модуль упругости и модуль деформаций. Начальный модуль упругости соответствует начальному этапу загрузки, тогда как в стадии эксплуатации и стадии разрушения фигурирует модуль деформации материала, меньший вследствие образования трещин в элементе и нелинейного поведения материала. Представлены экспериментальные исследования начального модуля упругости и модуля деформации сталефибробетона класса B60 при различных процентах фибрового армирования. Рассмотрены существующие подходы к определению начального модуля упругости. Проведено сравнение полученных результатов с исследованиями других авторов. Предложена аналитическая зависимость для определения модуля деформаций в зависимости от процента фибрового армирования.

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

The tangent modulus of elasticity and deformation modulus are the most important characteristics of steel fiber reinforced concrete. The tangent modulus of elasticity corresponds to the initial loading stage, whereas in the operation stage and the fracture stage, there is a modulus of the material deformation, which is smaller, due to the formation of cracks in the element and non-linear behavior of the material. The paper presents experimental investigations of the tangent modulus of elasticity and the deformation modulus of fiber-reinforced concrete, class B60 at various percentages of fiber reinforcement. Existing approaches to determination of the tangent modulus of elasticity are considered. The results obtained are compared with those presented by other researchers. Analytical dependence is proposed for determination of deformation modulus depending on the percentage of fiber reinforcement.

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

Важнейшими характеристиками материала являются начальный модуль упругости и модуль деформаций. Начальный модуль упругости соответствует начальному этапу загрузки, тогда как в стадиях эксплуатации и разрушения фигурирует модуль деформации материала, меньший вследствие образования трещин в эле-

менте и нелинейного поведения материала. Так, в СП 430.1325800.2018 «Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования» при расчете монолитных конструктивных систем допускается учитывать нелинейную работу элементов путем умножения их линейных жесткостей (начального модуля упругости) на понижающие

коэффициенты. Однако аналогичные данные, касающиеся расчета фибробетонных конструкций, отсутствуют.

Экспериментальные исследования модуля упругости фибробетона носят противоречивый характер. В ряде работ указывается увеличение модуля упругости фибробетонных образцов по сравнению с бетонными [1–3]. В работах [4, 5, 11] модуль упругости остается постоянным, в работах [6, 7] для бетона с крупным заполнителем модуль снижался. В целом отмечается, что для бетона с крупным заполнителем модуль упругости снижается с введением стальных фибр, а в мелкозернистом бетоне модуль упругости увеличивается. Неоднозначность существующих данных делает актуальными исследования в данном направлении.

Цель работы — получение новых экспериментальных данных, исследование деформативности сталефибробетона повышенных классов.

Имеющиеся методики расчета модуля упругости композитных материалов во многом базируются на «правиле смесей», которое гласит, что свойства композитного материала — это средневзвешенное свойств его компонентов [8]. Моделями, описывающими правило смесей, являются модели Рейсса и Фойхта [9], позволяющие найти модуль упругости для фибробетонных элементов.

По модели Рейсса

$$E = \frac{E_1 E_2}{\mu_1 E_2 + \mu_2 E_1}, \quad (1)$$

По модели Фойхта

$$E = \mu_1 E_1 + \mu_2 E_2, \quad (2)$$

где E_1 — модуль упругости бетона; E_2 — модуль упругости фибры; μ_1 — объемная доля бетона в элементе; μ_2 — объемная доля фибры в элементе.

Зарубежные исследователи [8] также предлагают к использованию формулу определения начального модуля упругости, полученную с помощью «правила смесей» с введением нескольких поправочных коэффициентов:

$$E = E_b(1 - \mu) + \eta_l \eta_\theta E_f \mu, \quad (3)$$

где η_l — коэффициент, учитывающий длину фибры; η_θ — коэффициент, учитывающий ориентацию фибры в бетонной матрице.

Установлено [10], что при увеличении процента содержания фибры свойства матрицы изменяются: происходит уменьшение размеров и количества пор, а структура цементного камня

на границе контакта фибры и матрицы уплотняется. Исследователи объясняют это свойством воды, которая вблизи поверхности твердых частиц становится в несколько раз более вязкой. Это обуславливает образование более прочного и плотного слоя цементного камня на границе контакта фибры и матрицы. Исходя из этого, автором утверждается, что формула расчета начального модуля упругости (2), которая применяется в СП 360.1325800.2017 «Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования», является применимой только для случаев с малым содержанием фибры в матрице.

В работе [12] рассматривается изотропный фибробетонный элемент единичного объема, ограниченный главными площадками, на которых действуют макронапряжения s_1, s_2, s_3 . Получено выражение модуля упругости в случае линейного напряженного состояния:

$$E = E_b + E_f \mu_f \left(\frac{1}{5} - \frac{4}{15} \nu + \frac{8}{15} \nu^2 \right), \quad (4)$$

где ν — коэффициент Пуассона.

Результаты численного анализа приведены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что при увеличении прочности и жесткости матрицы влияние фибр на модуль упругости уменьшается.

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.

Рис. 1. Зависимость модуля упругости фибробетона от модуля упругости бетона и процента армирования

Для определения модуля деформаций при напряжениях 70–80 % от предельных проведен ряд экспериментов. Были испытаны призмы с классом бетона В60 и В30 с процентом фибрового армирования 1 %, 1,5 % и 2 % на центральное кратковременное сжатие [13].

Для изготовления сталефибробетонных образцов был использован мелкозернистый бетон, полученный на основе портландцемента бездобавочного нормального твердения марки ЦЕМ I 42,5Н Д0 производства «Евроцемент». Мелким заполнителем являлся кварцевый песок с модулем крупности $M_k = 2,2$.

Для получения высокопрочного бетона были использованы добавки «ПОЛИПЛАСТ-3МБ» и «РЕЛАМИКС Т-2» производства «Полипласт Северо-Запад».

В качестве армирующего компонента использована фибра стальная анкерная ФСВ-А-0,30/30 производства Белорусского металлургического завода, изготовленная по ТУ 14-1-5564–2008 (рис. 2). Данная фибра имеет отгибы на концах, что позволяет улучшить ее сцепление с бетонной матрицей. Фибра изготовлена из высокоуглеродистой проволоки $d = 0,3$ мм с временным сопротивлением растяжению не менее 1200 МПа и модулем упругости не менее $2 \cdot 10^5$ МПа. Длина фибры составляет 3 см.

Фибробетонные образцы были получены с применением мелкозернистой бетонной матрицы. Приготовление бетонной смеси осуществлялось в лабораторном смесителе ЛС-ЦБ-10 при послойном введении компонентов. Далее в несколько приемов вводилась вода с растворенным в ней пластификатором. При этом важно удостовериться, что компоненты пластификато-

Рис. 2. Фибра стальная анкерная ФСВ-А-0,30/30. Общий вид

ра надлежащим образом перемешались с водой. После каждого введения воды смесь перемешивалась 60 с. Перемешивание продолжалось до получения однородной бетонной смеси.

Далее в бетонную смесь вводилась фибра. Для предупреждения образования локальных скоплений фибры (ежей) фибра вводилась дозированно.

Тепловлажностная обработка образцов осуществлялась в пропарочной камере КУП-1А при температуре изотермической выдержки 80 °С по следующему режиму:

- подъем температуры — 3 ч;
- изотермическая выдержка — 6 ч.

Испытания образцов-призм проводились на испытательных машинах с пределом нагружения 2500 кН. На предварительно отшлифованные образцы по всем четырем граням устанавливались тензометры Аистова.

Испытания проводились ступенчатым нагружением с выдержкой под нагрузкой в 4 мин. Ступени нагружения определялись в зависимости от разрушающей нагрузки и принимались равными:

- $0,2P_{\text{разр}}$ для определения начального модуля упругости образца;
- $0,7P_{\text{разр}}$ для определения модуля деформаций.

Полученные результаты (табл. 1) позволяют говорить о том, что введение высокомодульной фибры в образец увеличивает его деформативные характеристики. Увеличивается показатель предельной сжимаемости, прирост которого для высокопрочных бетонов составил до 20 %. При этом предельная сжимаемость увеличивается с характером, близким к линейному.

Модуль упругости с добавлением фибры изменяется в пределах 10 %, изменение имеет близкий к линейному характер (табл. 2).

Модуль деформации достигает 25 200 МПа при 1 % армирования, после чего постепенно снижается, достигнув при этом значения 23 500 МПа при 2 % армирования. Подобное поведение образцов при нагружении связано с увеличением их сжимаемости при добавлении большего количества фибры.

В табл. 3 представлено сравнение экспериментальных данных с вычисленными по разным методикам значениями начального модуля упругости.

Как видно из табл. 3, существующие нормы довольно хорошо описывают начальный модуль упругости при данных процентах армирования

Таблица 1

Результаты испытаний

Серия	Призменная прочность R_b , МПа	Начальный модуль упругости E_0 , МПа	Модуль деформации E_{fb} , МПа	Предельная сжимаемость ε_{fb0} , ‰
B60, 0 %	69,2	26 863,71	22 856,45	3,350
B60, 1 %	74,8	27 514,41	25 221,39	3,873
B60, 1,5 %	78,7	28 535,85	23 790,64	3,952
B60, 2 %	75,0	29 416,04	23 546,30	4,052

Таблица 2

Сравнение деформативных характеристик

Серия	E_0 , %	E_{fb} , %	ε_{fb0} , %
B60, 0 %	0	0	0
B60, 1 %	2,42	10,35	15,64
B60, 1,5 %	6,22	4,09	18
B60, 2 %	9,5	3,02	20,97

с небольшим завышением значений. Среднее отклонение составляет 3,41 %.

На основании полученных экспериментальных данных были построены аппроксимированные кривые (рис. 3) для модуля упругости и деформаций.

Полученные кривые имеют выпуклую форму с точкой максимума в промежутке с $\mu_f = 1-2$ %. Дальнейшее уменьшение характеристик фибробетонной смеси связано с истончением матричного слоя фибры, при котором ухудшается возможность совместной работы фибры и бетонной матрицы. Таким образом, содержание фибры в 1–2 % позволяет получить наибольший прирост в прочностных и деформативных характеристиках относительно неармированной смеси, и дан-

Рис. 3. График зависимости модуля деформаций от процента фибрового армирования

ный процент армирования для высокопрочного сталефибробетона можно назвать оптимальным.

Аппроксимировав данные кривые, имеем следующие зависимости для модуля деформаций:

$$E = E_b - 1694\mu_f^2 + 3522\mu_f. \quad (5)$$

В табл. 4 представлено сравнение модуля деформации с исследованиями других авторов.

Выводы

1. С добавлением фибры модуль упругости увеличивается по зависимости, близкой к линейной.

Таблица 3

Сравнение экспериментальных значений начального модуля упругости с теоретическими

Серия	Эксперимент, МПа	По СП 360.1325800.2017, МПа (2)	С введением поправочных коэффициентов, МПа (3)	По предложению Д. А. Смирнова, МПа (4)
B60, 1 %	27 514	28 591	26 885	27 196
Δ , %		3,9	-2,4	1,2
B60, 1,5 %	28 536	29 457	26 898	27 364
Δ , %		3,2	-6,1	4,2
B60, 2 %	29 416	30 323	26 911	27 532
Δ , %		3,1	-9,3	6,4
$\Delta_{\text{сред}}$, %		3,41	5,93	3,9

Таблица 4

**Сравнение модуля деформаций
с исследованиями других авторов**

Источник	Экспериментальное значение, МПа	По аппроксимированной кривой	Δ
Капустин Д. Е. [14]	34 000 ($\mu = 0,5 \%$)	30 838	9,3
	29 500 ($\mu = 1 \%$)	31 330	6,2
	32 500 ($\mu = 1,5 \%$)	30 573	5,9
Хегай А. О. [15]	32 080 ($\mu = 1 \%$)	31 510	1,7
	30 960 ($\mu = 2 \%$)	29 960	3,2
	33 500 ($\mu = 3 \%$)	25 030	25,3
Хвастунов В. Л. [16]	53 208 ($\mu = 1,5 \%$)	54 378	2,2
Бахотский И. В. [17]	29 430 ($\mu = 1,5 \%$)	23 077	21,6
	30 600 ($\mu = 3 \%$)	27 090	11,5
Солодовников А. С. [18]	21 690 ($\mu = 1,13 \%$)	22 170	2,2

2. Добавление стальной фибры увеличивает модуль деформации образца. Максимальный прирост составляет 10 % и наблюдается при 1 % армирования. В дальнейшем прирост деформативных характеристик становится менее выраженным, подобное поведение образцов при нагружении связано с увеличением их сжимаемости при добавлении большего количества фибры.

3. Значения начального модуля упругости фибробетона, полученные с помощью формул, рекомендованных к применению в СП 360.1325800.2017, имеют достаточную сходимость с экспериментальными данными для применения их в проектировании. При этом значения являются завышенными в сравнении с реальными экспериментами.

Библиографический список

1. Свиридов Н. В., Коваленко М. Г. Бетон с прочностью 150 МПа на рядовых портландцементе // Бетон и железобетон. 1990. № 2. С. 21–22.

2. Свиридов Н. В., Коваленко М. Г., Чесноков В. М. Механические свойства особо прочного цементного камня // Бетон и железобетон. 1991. № 2. С. 7–9.

3. Черноусов Н. Н., Черноусов Р. Н. Изгибаемые сталефиброшлакобетонные элементы // Бетон и железобетон. 2010. № 4. С. 7–11.

4. Карпенко Н. И., Травуш В. И., Каприелов С. С., Мишина А. В., Андрианов А. А., Безгодов И. М. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона // Academia. Архитектура и строительство. 2013. № 1. С. 106–113.

5. Мишина А. В., Чилин И. А., Андрианов А. А. Физико-технические свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона // Вестник МГСУ. 2011. Т. 2. № 3. С. 159–165.

6. Морозов В. И., Хегай А. О. Исследования фиброжелезобетонных колон с высокопрочной арматурой // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3 (28). С. 34–36.

7. Опбул Э. К. Эффективное использование высокопрочной арматуры в изгибаемых элементах без предварительного напряжения: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 152 с.

8. Bentur A., Mindess S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. 2nd edition. Abingdon, UK: Taylor & Francis, 2007. 601 p.

9. Ледовской И. В., Русаков Т. С. Метод определения упругих характеристик неоднородных сред // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 6 (35). С. 39–46.

10. Пухаренко Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетона: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2004. 315 с.

11. Lequesne R. D. Behavior and Design of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Coupling Beams and Coupled-Wall Systems: PhD Thesis. Ann Arbor, MI: University of Michigan, 2011. 277 p.

12. Смирнов Д. А. Упругость и ползучесть сталефибробетона: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 106 с.

13. Хегай А. О., Кирилин Н. М., Хегай Е. О. Экспериментальные исследования прочностных свойств сталефибробетона повышенных классов // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 1 (72). С. 56–60.

14. Капустин Д. Е. Прочностные и деформационные характеристики несъемной сталефибробетонной опалубки как несущего элемента железобетонных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 211 с.

15. Хегай А. О. Внецентренно сжатые элементы из фибробетона, армированные высокопрочной арматурой: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 163 с.

16. Хвастунов В. Л., Хвастунов А. В., Пауск В. В. Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных бетонов и фибробетонов с низким удельным расходом цемента на единицу прочности // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 4. С. 15–23.

17. Бахотский И. В. Прочность фиброжелезобетонных конструкций в условиях кручения с изгибом: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 112 с.

18. Солодовников А. С. Численное моделирование деформирования физически нелинейного композита с короткими волокнами: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2017. 22 с.

References

1. Sviridov N. V., Kovalenko M. G. *Beton s prochnost'yu 150 MPa na ryadovykh portlandsementakh* [Concrete with a strength of 150 MPa with the use of ordinary Portland cement]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 1990, no. 2, pp. 21–22.

2. Sviridov N. V., Kovalenko M. G., Chesnokov V. M. *Mekhanicheskie svoystva osobo prochnogo tsementnogo kamnya* [Mechanical properties of high-strength hardened cement paste]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 1991, no. 2, pp. 7–9.

3. Chernousov N. N., Chernousov R. N. *Izgibaemye stalefibroshlakobetonnye elementy* [Bent elements of steel fiber cinder block reinforced concrete]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2010, no. 4, pp. 7–11.

4. Karpenko N. I., et al. *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh i reologicheskikh svoystv vysokoprochnogo stalefibrobetona* [Investigation of physical-mechanical and rheological properties of high-strength steel fiber concrete]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo – Academia. Architecture and Construction*, 2013, no. 1, pp. 106–113.

5. Mishina A. V., Chilin I. A., Andrianov A. A. *Fiziko-tekhnicheskie svoystva sverkhvysokoprochnogo stalefibrobetona* [Physical and technical properties of ultra high-strength steel fiber reinforced concrete]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 159–165.

6. Morozov V. I., Khagai A. O. *Issledovaniya fibrozhelezobetonnykh kolon s vysokoprochnoy armaturoy* [Research of steel fiber concrete columns with high strength reinforcement]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2011, no. 3 (28), pp. 34–36.

7. Ogbul Eh. K. *Effektivnoe ispol'zovanie vysokoprochnoy armatury v izgibaemykh elementakh bez predvaritel'nogo napryazheniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Efficient use of high-strength reinforcement in bending elements without pre-stressing. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2005, 152 p.

8. Bentur A., Mindess S. *Fibre reinforced cementitious composites*. 2-nd ed. Abingdon, UK, Taylor & Francis Publ., 2007, 601 p.

9. Ledovskoy I. V., Rusakov T. S. *Metod opredeleniya uprugikh kharakteristik neodnorodnykh sred* [Determination method of elastic properties of inhomogeneous media].

Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers, 2012, no. 6 (35), pp. 39–46.

10. Pukhareno Yu. V. *Nauchnye i prakticheskie osnovy formirovaniya struktury i svoystv fibrobetonov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific and practical bases of formation of fiber-reinforced concrete structure and properties. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2004, 315 p.

11. Lequesne R. D. *Behavior and design of high-performance fiber-reinforced concrete coupling beams and coupled-wall systems: PhD Thesis*. Ann Arbor, MI, University of Michigan, 2011, 277 p.

12. Smirnov D. A. *Uprugost' i polzuchest' stalefibrobetona*. Diss. kand. tekhn. nauk [Elasticity and creep characteristics of steel fiber reinforced concrete]. St. Petersburg, 2011, 106 p.

13. Khagai A. O., Kirilin N. M., Khagai E. O. *Eksperimentalnye issledovaniya prochnostnykh svoystv stalefibrobetona povyshennykh klassov* [Experimental study of strength properties of steel fiber reinforced concrete of higher classes.]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 1 (72), pp. 56–60.

14. Kapustin D. E. *Prochnostnye i deformatsionnye kharakteristiki nes'emnoy stalefibrobetonnoy opalubki kak nesushchego elementa zhelezobetonnykh konstruksiy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Strength and deformation characteristics of fixed steel-fiber concrete formwork as a bearing element of reinforced concrete structures. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2015, 211 p.

15. Khagai A. O. *Vnetsentrenno szhatye elementy iz fibrobetona, armirovannye vysokoprochnoy armaturoy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Eccentrically compressed elements made of fiber reinforced concrete with high-strength reinforcement. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2011, 163 p.

16. Khvastunov V. L., Khvastunov A. V., Pausk V. V. *Prochnostnye i deformatsionnye kharakteristiki vysokoprochnykh betonov i fibrobetonov s nizkim udel'nym raskhodom tsementa na edinitsu prochnosti* [Strength and deformation characteristics of high-strength concrete and fiber-reinforced concrete with low specific consumption of cement per unit of strength]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo – Regional Architecture and Construction*, 2014, no. 4, pp. 15–23.

17. Bakhotskiy I. V. *Prochnost' fibrozhelezobetonnykh konstruksiy v usloviyakh krucheniya s izgibom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Strength of fibro-reinforced concrete structures under torsion and bending conditions. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2013, 112 p.

18. Solodovnikov A. S. *Chislennoe modelirovanie deformirovaniya fizicheski nelineynogo kompozita s korotkimi voloknami: Avtoref. diss. kand. fiz.-mat. nauk* [Numerical modeling of deformation of a physically nonlinear composite reinforced with short fibers. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2017, 22 p.