

Б. И. ПИНУС
И. Г. КОРНЕЕВА

ОБ ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ЦИКЛИЧЕСКИМ НАГРУЖЕНИЯМ

ON THE ASSESSMENT OF THE STRENGTH OF BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS SUBJECTED TO CYCLIC LOADING

Представлены результаты вероятностно-статистического анализа усталостного сопротивления обычных и фиброполипропиленсодержащих железобетонных изгибаемых элементов с использованием нормативных методов расчета по предельным усилиям, нелинейным деформационным моделям и экспериментальным данным внутреннего сопротивления композитов после 50 циклов нагружения с амплитудой $\eta = 0,8$ и нулевой асимметрией. Установлена повышенная прочность и усталостная долговечность элементов с фибробетоном при армировании конструкций менее граничного уровня. Предполагается, что введение полипропиленовых мелкодисперсных волокон способствует внутреннему перераспределению усилий в цикловом и последующем монотонном нагружении.

Ключевые слова: усталость, полипропиленфибробетоны, изгибаемые элементы

Многочисленные данные технического мониторинга железобетонных конструкций зданий и сооружений свидетельствуют о постепенной трансформации их под влиянием технологических, температурно-климатических, геотехнических и других воздействий умеренной (ниже расчетной) нестационарной интенсивности. Учитывая физические закономерности инициируемых процессов, состоящих в образовании, развитии и накоплении микротрещин, имеются основания анализировать ожидаемые последствия с позиций малоциклового усталости [1-3]. При таком подходе определяющим фактором усталостной деградации цементно-матричных структур становится их способность к развитию и формированию магистральных (критических) [4, 5] микротрещин.

Одним из технологически приемлемых и технически эффективных методов ее достижения является мелкодисперсное фиброармирование, создающее «... внутреннюю среду переноса напряжений и препятствующее срастанию микротрещин и их неустойчивому росту» [6-9]. Широкий спектр используемых

The results of a probabilistic and statistical analysis of the fatigue resistance of conventional and fibropropylene containing reinforced concrete bending elements using standard calculation methods based on limiting forces, nonlinear deformation models and experimental data of the internal resistance of composites after 50 loading cycles with an amplitude of $\eta = 0.8$ and zero asymmetry are presented. The increased strength and fatigue durability of elements with fiber-reinforced concrete, when reinforcing structures less than the boundary level, has been established. It is assumed that the introduction of polypropylene fine fibers contributes to the internal redistribution of forces in cyclic and subsequent monotonous loading.

Keywords: fatigue, polypropylene fiber-reinforced concrete, bendable elements

волокон позволяет целенаправленную коррекцию параметров внутреннего сопротивления композитов с учетом фактических критериев условий работоспособности. Ранее [10, 11] нами была обоснована техническая целесообразность использования полипропиленовых волокон с аспектным соотношением $l_i/d_i = 40/0,8 = 50$ в качестве объемного (случайно распределенного) армирования. Их применение способствует структурной модификации, обладающей высоким потенциалом пластично-сдвигового деформирования [11-13] и, как следствие, внутреннего перераспределения усилий.

Вероятностно-статистический анализ усталостного сопротивления изгибаемых и внецентренно-сжатых железобетонных элементов с комбинированным (объемным фибропропиленовым и стальным стержневым) армированием составляет основное содержание настоящей статьи.

Методика исследования

Изменение потенциала внутреннего сопротивления после циклических нагружений различной интенсивности прогнозируется посред-

ством валидации нормативной методики (пп. 8.1.20-8.1.30 СП 63.13330 «Бетонные и железобетонные конструкции») для сравнения влияния усталостных последствий в обычных (серия ОБ) и фиброармированных элементах (серия ФБ). При этом был разработан в среде Excel алгоритм расчета прочности, использующий нормативные нелинейные деформационные модели, экспериментальные диаграммы $\sigma_b-\varepsilon_b$ и позволяющий учитывать неоднородность распределения напряжений по высоте сечения.

Численное моделирование прочности осуществляется путем условной разбивки сечения на участки ограниченной толщины, в пределах которой деформации (напряжения) принимаются постоянными и соответствующими распределению для плоских сечений.

Методом последовательных приближений на каждом этапе устанавливается величина относительной высоты сжатой зоны ξ_v , при которой соблюдается условие равновесия внешнего усилия N и внутреннего сопротивления

$$N = \sum \sigma_{bi}(\varepsilon_i) \cdot A_{bi} + \sum \sigma_{sj}(\varepsilon_j) \cdot A_{sj} \quad (1)$$

Здесь обозначения соответствуют нормативным, а напряжения в бетоне и арматуре принимаются по двух-трехлинейным верифицированным по экспериментальным данным диаграммам $\sigma_b-\varepsilon_b$ в зависимости от деформации i , j -го слоя и с учетом знака и растянутого бетона для фиброармированных элементов.

Соответствующее значение моментов сопротивления внутренних сил определяется как

$$M = \sum \sigma_{bi}(\varepsilon_i) \cdot A_{bi} \cdot Z_{bxi} + \sum \sigma_{sj}(\varepsilon_j) \cdot A_{sj} \cdot Z_{sxj} \quad (2)$$

При выполнении критериального условия разрушения

$$\varepsilon_b \leq \varepsilon_{b,ult} \quad (3)$$

предельно допустимая деформация $\varepsilon_{b,ult}$ принимается равной экспериментальным значениям на постпиковом участке диаграмм сжатия до напряжений $0,8\sigma_u$.

Численный эксперимент по указанным деформационным моделям и предельным нормативным (СП 63.13330 «Бетонные и железобетонные конструкции») усилиям выполнен на примере балки прямоугольного сечения ($b \times h = 100 \times 200$ мм) с односторонним армированием (класс А400, $\mu = 1-6\%$), изготовленной из бетонов обычного (Ц:П:Щ:В = 1:1,42:3,31:0,55) и фиброармированного (тот же с добавлением 1,5 % полипропиленовых фибр с $l_f/d_f = 40/0,8$). Усталостное сопротивление композитов оценивалось по изменению M_{ult} различного уровня обеспеченности по истечении 50 циклов нагружения с амплитудой $\eta = 0,8$ и нулевой асимметрией с использованием экспериментальных данных, приведенных в табл. 1. Численные значения соответствующих параметров нелинейных деформационных моделей представлены графически с нормируемой обеспеченностью 99 % (рис. 1).

Обсуждение результатов

Вероятностное изменение несущей способности балок различного уровня армирования в условиях статического (СН) монотонного и тождественного постциклического (СН_ц) представлено на рис. 2.

Как и следовало ожидать, кинетика несущей способности балок серий одинакова при армировании μ менее граничного ($\mu_R = 2,5 \div 3\%$), поскольку она (в соответствии с предпосылками СП 63.13330 «Бетонные и железобетонные конструкции») определяется только потенциалом прочности растянутой арматуры. Это подтверждается и практической тождественностью изменения показателей различного уровня обеспеченности. Примечательно, что в этом диапазоне армирования несущая способность балок серии ФБ выше обычных аналогов при сравнительно меньшей прочности бетона.

Таблица 1

Экспериментальные данные для расчета по предельным усилиям

Серия	Обозначение	Ед. изм.	Исходные			После $N = 50 \eta = 0,8$		
			средние	min 95 %	min 99 %	средние	min 95 %	min 99 %
ОБ	R_b	МПа	43,57	41,03	39,76	37,43	33,54	31,59
	$\varepsilon_{b,ult}$	$\times 10^5$	313	277	258	238	182	153
	ξ_R		0,518	0,496	0,486	0,466	0,418	0,394
ФБ	R_{fb}	МПа	35,79	33,63	32,55	35,36	29,66	26,8
	$\varepsilon_{b,ult}$	$\times 10^5$	318	262	234	233	190	168
	ξ_R		0,521	0,489	0,473	0,462	0,425	0,406

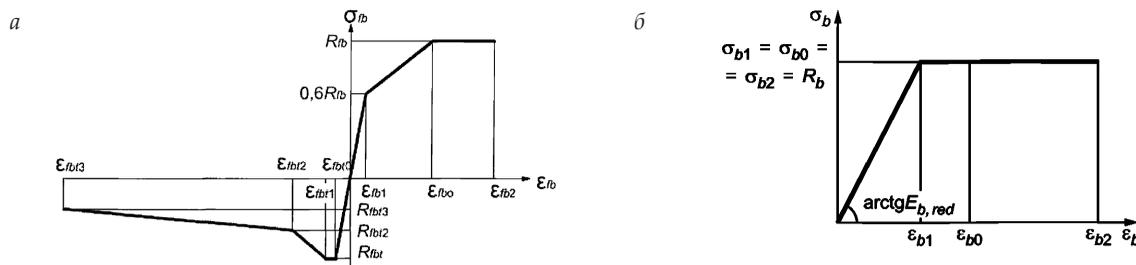


Рис. 1. Деформационные модели:
а – фибробетона; б – бетона

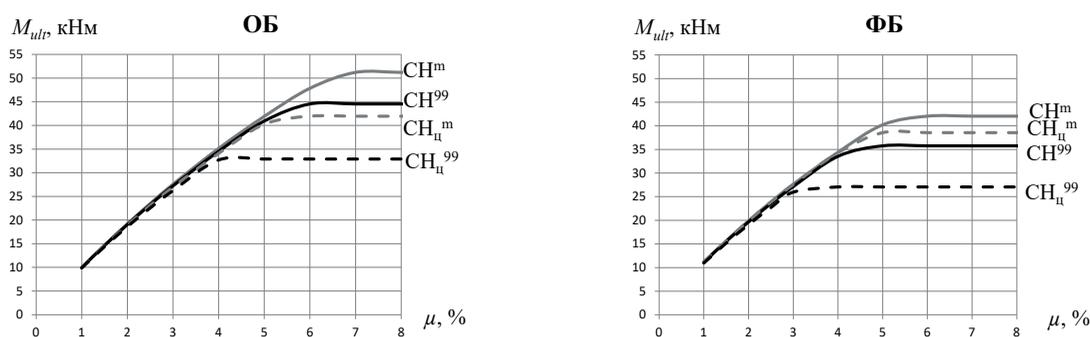


Рис. 2. Влияние армирования на средние (CH^m) и 99 % обеспеченности (CH^{99}) показатели прочности балок

Влияние факторов усталостной трансформации композитов существенно возрастает в переармированных элементах и сказывается:

- в снижении уровня стабилизации несущей способности;
- различии показателей M_{ult} , определяемых по параметрам среднего и нормативного (99%) уровней обеспеченности.

При этом в изгибаемых элементах классического армирования вероятно 20-30 %-е (зависит от μ) снижение постциклической прочности.

Для установления причинно-следственных связей повышенной динамической устойчивости нормально армированных фибробетонных элементов проведена дополнительная оценка параметров сжатой зоны с использованием нормативных деформационных моделей (рис. 1, табл. 2), позволяющих идентифицировать эпюру распределения напряжений сжатой зоны в соответствии с параметрами ее послойного деформирования. Приемлемость такого подхода для сравнительного анализа усталост-

Таблица 2

Изменение параметров сжатой зоны при циклических воздействиях

Серия, этап состояния	Процент армирования	По предельным усилиям			По деформационной модели		
		высота сжатой части	площадь эпюры	предельный момент	высота сжатой части	площадь эпюры	предельный момент
		x	A_c	M_{ult}	x	A_c	M_{ult}
	μ	см	МПа·см	кН·м	см	МПа·см	кН·м
ОБ CH^{99}	1	1,5	59,5	9,97	6,26	66,34	9,44
	1,5	2,24	89,25	14,62	7,22	97,07	13,82
	2	2,99	119	19,04	8,03	128,82	18,15
	2,5	3,74	148,75	23,25	8,69	160,72	22,38
	3	4,49	178,5	27,23	9,21	189,4	26,41

Серия, этап состояния	Процент армирования	По предельным усилиям			По деформационной модели		
		высота сжатой части	площадь эпюры	предельный момент	высота сжатой части	площадь эпюры	предельный момент
	μ %	x см	A_c МПа·см	M_{ult} кН·м	x см	A_c МПа·см	M_{ult} кН·м
ОБ СН _Ц ⁹⁹	1	1,88	59,5	9,85	6,01	65,18	9,44
	1,5	2,83	89,25	14,36	6,95	94,64	13,79
	2	3,77	119	18,58	7,25	125,93	18,08
	2,5	4,71	148,75	22,53	8,42	154,21	22,04
	3	5,62	178,5	26,19	11,41	181,71	25,7
ФБ СН ⁹⁹	1	2,25	73,17	11,11	7,42	78,58	11,09
	1,5	3,14	102,23	15,52	8,24	108,96	15,27
	2	4,03	131,29	19,65	8,94	139,65	19,36
	2,5	4,93	160,36	23,53	9,52	167,51	23,26
	3	5,82	189,42	27,14	10,1	196,69	26,92
ФБ СН _Ц ⁹⁹	1	2,72	72,81	10,94	6,74	77,84	10,94
	1,5	3,8	101,73	15,17	7,62	107,86	15,17
	2	4,87	130,65	19,09	8,37	135,51	19,07
	2,5	5,95	159,57	22,68	9,1	159,93	22,13
	3	7,03	188,48	25,96	11,37	186,27	25,59

ной долговечности подтверждается практической тождественностью соотношений высот и площадей сжатой зоны рассматриваемых элементов. Становится возможным предположить, что установленное превышение прочности изгибаемых фибросодержащих элементов объяснимо повышенной способностью к перераспределению усилий [13, 14] и, как следствие, большей полнотой эпюры напряжений (рис. 3). Различие напряжений в соответствующих сечениях элементов возрастают в слоях, примыкающих к нейтральной зоне элементов.

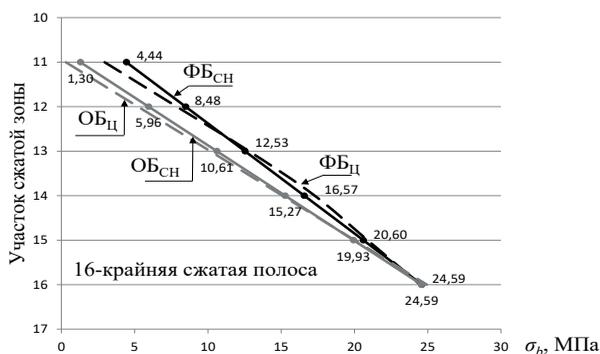


Рис. 3. Послойное изменение напряжений сжатой зоны

Выводы. Фиброармирование бетона полипропиленовыми волокнами:

- повышает несущую способность изгибаемых железобетонных элементов при их конструктивном армировании менее граничного;
- увеличивает усталостное сопротивление элементов за счет развития внутреннего трения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузовчикова Е. А., Яшин А. В. Исследование влияния малоцикловых сжимающих воздействий на деформативность, прочность, и структурные изменения бетона // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1976. №10. С. 30–35.
2. Isojeh B, El-Zeghayar M, Vecchio F.J. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression // ACI Materials Journal. 2017. No 114(2). P. 225–235. DOI:10.14359/51689477.
3. Gao L., Hsu TCC. Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading // ACI Materials Journal. 1998. No 95(5). P. 575–581.
4. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография. М.: АСВ, 2004. 560 с.
5. Huang B, Li Q, Xu S, Zhou B. Effect of loading frequency on the fatigue behavior of ultra-high

toughness cementitious composites in compression 14th International Conference on Fracture (ICF 14) June18–23, 2017, Rhodes, Greece.

6. Liu F, Zhou J. Fatigue strain and damage analysis of concrete in reinforced concrete beams under constant amplitude fatigue loading. *Shock and Vibration*. 2016. DOI:10.1155/2016/3950140.

7. Cachim P.B., Figueiras J.A., Pereira P.A.A. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression // *Cement and Concrete Composites*. 2002. No 24(9). P. 211–217.

8. Paskova T, Meyer C. Low-cycle fatigue of plain and fiber reinforced concrete // *ACI Materials Journal*. 1997. No 94(4). P. 273–285.

9. Ramakrishnan V., Gollapudi S., Zellers R. Performance Characteristics and Fatigue of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete // SP-105, American Concrete Institute: Detroit, 1987. P. 159–177.

10. Korneeva I.G., Pinus B.I. Deformation fatigue fibroproliferative concrete under dynamic effects // *Contemporary Problems of Architecture and Construction Proceedings of the 12th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction*, November Saint Petersburg, 25–26, 2020, P.198–202. DOI: 10.1201/9781003176428.

11. Korneeva I.G., Pinus B. I. Energy aspects of low-cycle fatigue of fibropolypropylene concrete // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety Sochi*, 6-12 September 2020. DOI:10.1088/1757-899X/962/2/022020.

12. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Госстройиздат, 1960. 131 с.

13. Li C. Y., Song Y. P. Study of residual strain of concrete under fatigue loading // *Journal of Dalian University of Technology*. 2001. Vol. 41, No. 3. P. 355–358.

14. Lee M. K., Barr B. I. G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete // *Cement & Concrete Composites*. 2003. No 26(2004). P. 299–305.

REFERENCES

1. Kuzovchikova E.A., Yashin A.V. Investigation of influence of low-cycle compression impact on deformability, strength and structural changes of concrete. *Izvestiia vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura* [Universities News. Construction and architecture], 1976, no. 10, pp. 30–35 (in Russian)

2. Isojeh B., El-Zeghayar M., Vecchio F.J. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression. *ACI Materials Journal*. 2017. No. 114 (2). P. 225–235. DOI:10.14359/51689477

3. Gao L., Hsu, T.C.C. Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading. *ACI Materials Journal*. 1998. No. 95(5). P. 575–581.

4. Rabinovich F.N. *Kompozity` na osnove dispersno-armirovanny`x betonov. Voprosy` teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii* [Composites based on dispersedly-

reinforced concrete. Questions on theory and design, technology, constructions]. Moscow, ASV, 2004. 563 p.

5. Huang B., Li Q., Xu S., Zhou B. Effect of loading frequency on the fatigue behavior of ultra-high toughness cementitious composites in compression 14th International Conference on Fracture (ICF 14) June18–23, 2017, Rhodes, Greece.

6. Liu F., Zhou J. Fatigue strain and damage analysis of concrete in reinforced concrete beams under constant amplitude fatigue loading. *Shock and Vibration*. 2016. DOI:10.1155/2016/3950140

7. Cachim P.B., Figueiras J.A., Pereira P.A.A. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression. *Cement and Concrete Composites*. 2002. No. 24(9). P. 211–217.

8. Paskova T, Meyer C. Low-cycle fatigue of plain and fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*. 1997. No. 94(4). P. 273–285.

9. Ramakrishnan V., Gollapudi S., Zellers R. Performance Characteristics and Fatigue of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987. P. 159–177.

10. Korneeva I.G., Pinus B.I. Deformation fatigue fibroproliferative concrete under dynamic effects. *Contemporary Problems of Architecture and Construction Proceedings of the 12th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction*, November Saint Petersburg, 25–26, 2020, Pub. Location London Imprint CRC Press eBook ISBN 9781003176428. P. 198–202. DOI: 10.1201/9781003176428

11. Korneeva I.G., Pinus B.I. Energy aspects of low-cycle fatigue of fibropolypropylene concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety Sochi*, 6-12 September 2020. r. № 962 IOP Publishing, United Kingdom ISSN:1757-899X DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022020

12. Sorokin E.S. *K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyax uprugix system* [On the theory of internal friction during oscillations of elastic systems]. Moscow, Gosstrojizdat, 1960. 131 p.

13. Li C. Y., Song Y. P. Study of residual strain of concrete under fatigue loading. *Journal of Dalian University of Technology*. 2001. vol. 41, No. 3. P. 355–358.

14. Lee M. K., Barr B. I. G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites*. 2003. No. 26(2004). P. 299–305.

Об авторах:

ПИНУС Борис Израилевич

доктор технических наук, профессор
профессор кафедры строительного производства
Иркутский национальный исследовательский
технический университет
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
тел. (3952) 40-54-67
E-mail: pinus@istu.edu

PINUS Boris Iz.

Doctor of Engineering Science, Professor
Professor of the Building Production Chair
Irkutsk National Research Technical University
664074, Russia, Irkutsk, Lermontova str.,83
tel. (3952) 40-54-67
E-mail: pinus@istu.edu

КОРНЕЕВА Инна Геннадьевна

кандидат технических наук,
доцент кафедры строительного производства
Иркутский национальный исследовательский
технический университет
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
E-mail: kornee-inna@yandex.ru

KORNEEVA Inna G.

PhD in Engineering Science,
Associate Professor of the Building Production Chair
Irkutsk National Research Technical University
664074, Russia, Irkutsk, Lermontova str.,83
E-mail: kornee-inna@yandex.ru

Для цитирования: Пинус Б.И., Корнеева И.Г. Об оценке прочности изгибаемых железобетонных элементов, подвергнутых циклическим нагрузениям // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 3. С. 23–28. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.03.03.

For citation: Pinus B.I., Korneeva I.G. On the assessment of the strength of bent reinforced concrete elements subjected to cyclic loading. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 3, pp. 23–28. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.03.03.