

**Усталостная долговечность изгибаемых железобетонных элементов со смешанным армированием**© Борис Израилевич Пинус¹, Инна Геннадьевна Корнеева¹,
Валентина Доржиевна Балхеева²¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия²Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, РоссияАвтор, ответственный за переписку: Корнеева Инна Геннадьевна, kornee-inna@yandex.ru

Аннотация. Цель – экспериментально-вероятностный анализ изменений несущей способности изгибаемых железобетонных элементов с матрицами, фиброармированными полипропиленовыми волокнами. Численный эксперимент проведен с использованием нормативной методики многозвенного и послойного моделирования сечений элементов и экспериментальных диаграмм « $\sigma - \varepsilon$ » фиброкомпозитов в исходном и постциклическом (50 циклов с амплитудой $\eta = 0,8$ и нулевой асимметрией) состояниях. Вероятностные изменения несущей способности изгибаемых элементов, подвергнутых циклическим нагружениям, оценивались численным моделированием прочности балок прямоугольного сечения ($b \times h = 100 \times 200$ мм) с односторонним армированием (класс А400) различной интенсивности. Установлена высокая усталостная долговечность фиброармированных железобетонных элементов, обусловленная наличием компенсационных механизмов структурных изменений – снижению прочности сопутствует повышение способности к перераспределению внутренних усилий. Постциклическое снижение прочности бетона практически не сказывается на несущей способности изгибаемых элементов с большим и экономически предпочтительным диапазоном их конструктивного армирования. Проанализирована кинетика надежности элементов, оцениваемая уровнем реализуемого потенциала прочности бетона. Подтверждается, что при умеренном ($\mu \leq \mu_R$) армировании имеются объективные условия повышения полноты эпюры напряжений в сжатой части сечения за счет перераспределения усилий по высоте. Благодаря этому практически не изменяется после циклических воздействий несущая способность элементов при армировании $\mu \leq 2,5$ %, несмотря на существенное снижение прочности бетона.

Ключевые слова: фибробетон, прочность, усталость, изгибаемые элементы

Для цитирования: Пинус Б. И., Корнеева И. Г., Балхеева В. Д. Усталостная долговечность изгибаемых железобетонных элементов со смешанным армированием // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 3. С. 362–367. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-3-362-367>.

Original article

Fatigue life of bending reinforced concrete elements with fibre-reinforced matricesBoris I. Pinus¹, Inna G. Korneeva¹, Valentina D. Balheeva²¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia²East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, RussiaCorresponding author: Inna G. Korneeva, kornee-inna@yandex.ru

Abstract. An experimental-probabilistic analysis of variations in the load-bearing capacity of bending reinforced concrete elements with matrices reinforced by polypropylene fibres was carried out. A numerical experiment was conducted using the normative methodology of multi-link and layerwise modelling of element cross-sections and experimental " $\sigma - \varepsilon$ " diagrams of fibrocomposites in initial and post-cyclic (50 cycles with $\eta = 0.8$ amplitude and zero asymmetry) states. Probabilistic changes in the load-bearing capacity of bending elements subjected to cyclic loads were estimated by the numerical strength modelling of rectangular beams ($b \times h = 100 \times 200$ mm) with the one-sided reinforcement (A400 class) of varying intensity. The observed high value of fatigue life of reinforced concrete elements with fibre-

reinforced matrices was found to be associated with the presence of mechanisms compensatory for structural changes, i.e., a decrease in the strength is accompanied by an increase in the ability to redistribute internal forces. A post-cyclic reduction in the strength of concrete causes practically no effect on the load-bearing capacity of bending elements with a large and economically preferable range of their structural reinforcement. The reliability kinetics of elements, estimated by the level of the realised concrete strength potential, was analysed. Moderate ($\mu \leq \mu_R$) reinforcement was found to result in objective conditions for increasing the completeness of the stress diagram in the compressed cross-sectional part due to the redistribution of forces along the height. In this case, despite a significant decrease in the strength of concrete, the load-bearing capacity of elements at $\mu \leq 2.5\%$ reinforcement remains practically the same after cyclic effects.

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

For citation: Pinus B. I., Korneeva I. G., Balheeva V. D. Fatigue life of bending reinforced concrete elements with fibre-reinforced matrices. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2022;12(3):362-367. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-3-362-367>.

Введение

Одним из факторов структурной трансформации цементных композитов являются нестационарные механические и температурно-влажностные воздействия с амплитудой ниже нормативно регламентируемого уровня. Иницируемые ими отклики представляют собой затухающие колебательные процессы с последствиями¹ [1–5], кинетика которых определяется скоростью развития трещин до критического уровня [6–9]. Эффективное и технологически доступное торможение усталостной деградации достигается посредством объемного мелкодисперсного армирования композитов волокнами с оптимальными геометрическими (аспектным соотношением диаметра и длины) и механическими параметрами. Неоднозначность и разнонаправленность сопутствующих изменений прочностных, деформативных и энергетических параметров внутреннего сопротивления [10–17] предопределяют необходимость проверки соответствия конструктивных элементов требованиям критериев их эксплуатационной пригодности. Анализ усталостных изменений прочности изгибаемых железобетонных элементов с цементными матрицами, модифицированными пропиленовыми (ПП) волокнами ($d_{f экв.} = 0,8$ мм и $l_f = 40$ мм), составляет основное содержание настоящей работы.

Методика исследования

Вероятностный прогноз несущей способности выполнен численным моделированием с использованием нормативных функцио-

нальных критериальных зависимостей и экспериментальных, статистически представительных данных кинетики при циклических воздействиях (ЦВ) значимых параметров внутреннего сопротивления фиброкомпозита (Ц:П:Щ:В = 1:1,42:3,57:0,5 и $\mu_f = 1,5$ % объема). Использована нормативная методика многослойного моделирования сечений элементов, при которой величина расчетного усилия определяется (СП 63.13330.2012, пп. 8.1.20–8.1.30) как сумма

$$M = \sum \sigma_{bi}(\varepsilon_i) \cdot A_{bi} \cdot Z_{bxi} + \sum \sigma_{sj}(\varepsilon_j) \cdot A_{sj} \cdot Z_{sxj}, \quad (1)$$
где напряжения i (j) слоя сечения определяются его фактической деформацией.

При этом в качестве критериального условия разрушения принимается достижение крайними сжатыми волокнами сечения предельной деформации $\varepsilon_{b,ult}$, соответствующей напряжению $0,8\sigma_u$ на постпиковом участке диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ ». Расчетная деформационная модель представлена на рис. 1, а ее параметры в исходном (серия «ИС») и постциклическом (серия «ПЦ») состояниях – в табл. 1.

Результаты и их обсуждение

Вероятностные изменения несущей способности изгибаемых элементов, подвергнутых циклическим нагружениям, оценивались численным моделированием прочности балок прямоугольного сечения ($b \times h = 100 \times 200$ мм) с односторонним армированием (класс А400) различной интенсивности (рис. 2). Примечательно, что существенное (18 %) постциклическое снижение прочности бетона практически не сказывается на несущей способности

¹ГОСТ Р 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности. М.: Стандартинформ, 2016. 72 с.;

Корчинский И. Л., Беченева Г. В. Прочность строительных материалов при динамических нагружениях: пособие для проектировщиков. М.: Стройиздат, 1966. 212 с.

изгибаемых элементов с большим и экономически предпочтительным диапазоном их конструктивного армирования. Если учесть, что используемый здесь метод не содержит нормативных критериев типа «граничная высота сжатой зоны», можно предполагать наличие компенсирующих (снижение R_b) механизмов

перераспределения внутренних усилий. С целью их установления были определены параметры высоты и площади сжатой зоны, произведен расчет реализуемой прочности бетона при действии усилия, тождественного M_{ult} (табл. 2), и выявлено их относительное изменение с увеличением μ .

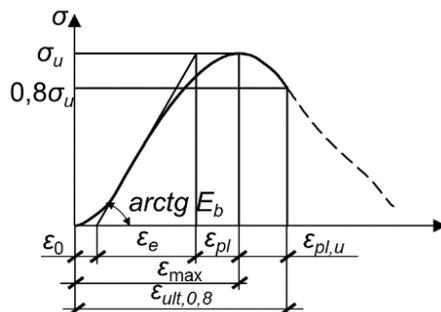


Рис. 1. Деформационная модель
Fig. 1. Deformation model

Таблица 1. Расчетные значения параметров нелинейной деформационной модели
Table 1. Calculated values of parameters of the nonlinear deformation model

Этап испытания	Индекс этапа	Прочностные, МПа				Деформации, ‰		
		R_b	σ_b	E_b	$E_{b,1}$	ϵ_{b1}	ϵ_{b2}	ϵ_{b0}
Исходный	«ИС»	32,6	19,6	17190	14610	1,14	2,34	1,91
После ЦВ*)	«ПЦ»	26,8	16,1	23390	19880	0,69	1,68	1,32

*) 50 циклов с амплитудой $\eta = 0,8$ и нулевой асимметрией.

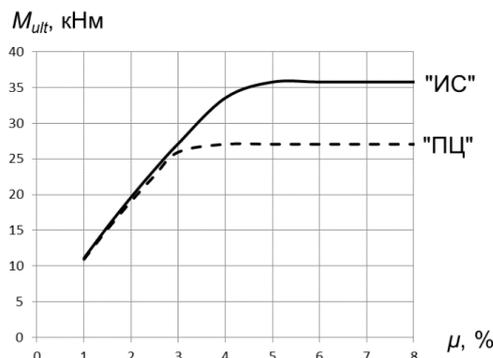


Рис. 2. Зависимость прочности изгибаемых элементов от уровня армирования
Fig. 2. Dependence of the strength of the bent elements on the level of reinforcement

Примечательно, что кинетика параметров, определяющих сопротивление сжатой зоны сечения элементов, неоднозначна. Практически одинаковое и сравнительно большее возрастание A_c и M_{ult} происходит при незначительных изменениях высоты сжатой зоны.

Это позволяет предполагать увеличение полноты эпюры напряжений сжатой зоны с повышением армирования. Для проверки этого предположения выполнен численный эксперимент с решением обратной задачи – определение среднего значения реализуемой прочности бетона R_{bi} при действии внешних усилий, равных $M_{i,ult}$. Его кинетика (табл. 2, 3) характе-

ризуется плавным возрастанием с явной тенденцией снижения прироста с увеличением μ . Она закономерна и обусловлена сопутствующим повышением вероятности хрупкого разрушения элемента с раздроблением сжатой зоны [8, 9]. Таким образом, подтверждается, что при умеренном ($\mu \leq \mu_R$) армировании имеются объективные условия повышения полноты эпюры напряжений в сжатой части сечения за счет перераспределения усилий по высоте. Благодаря этому практически не изменяется после «ЦВ» несущая способность элементов при армировании $\mu \leq 2,5\%$, несмотря на существенное снижение прочности бетона.

Таблица 2. Изменение параметров сжатой зоны изгибаемых элементов при циклических воздействиях

Table 2. Changing the parameters of the compressed zone of the bent elements at cyclic effects

Процент армирования μ , %	Исходное состояние				Постциклическое состояние			
	Высота сжатой части x , см	Площадь эпюры A_c , МПа*см	Предельный момент M_{ult} , кНм	Реализация прочности бетона R_b , МПа	Высота сжатой части x , см	Площадь эпюры A_c , МПа*см	Предельный момент M_{ult} , кНм	Реализация прочности бетона R_b , МПа
1	7,42	73,6	11,1	11,2	6,74	77,8	10,9	11,8
1,5	8,24	109,0	15,3	14,4	7,52	103,4	14,9	15,0
2	8,94	139,7	19,4	17,3	8,37	135,5	19,1	17,8
2,5	9,52	167,5	23,3	19,9	9,11	159,9	22,1	19,6
3	10,1	196,7	26,9	22,2	10,4	176,9	22,6	20,8

Таблица 3. Влияние армирования на кинетику показателей прочности

Table 3. Effect of reinforcement on the kinetics of strength indicators

Процент армирования	Исходное состояние				Постциклическое состояние			
	$\frac{x_{i+1}}{x_i}$	$\frac{A_{ci+1}}{A_{ci}}$	$\frac{M_{i+1}}{M_i}$	$\frac{\bar{R}_{bi}}{R_{b\mu}}$	$\frac{x_{i+1}}{x_i}$	$\frac{A_{ci+1}}{A_{ci}}$	$\frac{M_{i+1}}{M_i}$	$\frac{\bar{R}_{bi}}{R_{b\mu}}$
1	1	1	1	0,34	1	1	1	0,44
1,5	1,11	1,39	1,38	0,44	1,11	1,41	1,37	0,56
2	1,08	1,28	1,27	0,53	1,11	1,31	1,28	0,66
2,5	1,07	1,20	1,20	0,61	1,09	1,18	1,16	0,73
3	1,06	1,17	1,15	0,68	1,14	1,10	1,03	0,78

Вероятно 15–30 % увеличение потенциала его внутреннего сопротивления сжатию, реализуемого при действии расчетных предельных усилий, с высоким уровнем обеспеченности.

Заключение

Таким образом, исследование показало, что:

1. Циклические механические воздействия переменной амплитуды, асимметрии и продолжительности ведут к усталостной трансформации структуры железобетонных элементов,

последствия данных воздействий должны оцениваться комплексным учетом инициируемых изменений прочностных и деформативных свойств матриц и уровня конструктивного армирования.

2. Объемное дисперсное армирование цементных композитов полипропиленовыми фиброволокнами способствует повышению их усталостной долговечности вследствие увеличения способности к перераспределению внутренних усилий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Новое о прочности железобетона / под ред. К. В. Михайлова. М.: Стройиздат, 1977. 272 с.
- Москвитин В. В. Циклическое нагружение элементов конструкций. М.: Наука, 1981. 344 с.
- Расторгуев Б. С., Цепелев С. В. Перераспределение усилий в железобетонных конструкциях при малоцикловых воздействиях // Бетон и железобетон. 1989. № 10. С. 16–18.
- Рыков Г. В., Обедов В. П., Майоров Е. Ю., Абрамкина В. Т. Экспериментальные исследования процессов деформирования и разрушения бетонов при циклических динамических нагрузках // Строительная механика и расчет сооружений. 1992. № 1. С. 71–76.
- Беченева Г. В. Прочность бетона при немногочисленных повторных нагружениях //

- Исследования по сейсмостойкости зданий и сооружений. Труды ЦНИИСК. 1961. Вып. 6. С. 91–118.
- Ставров Г. Н., Руденко В. В., Федосеев А. А. Прочность и деформативность бетона при повторно-статических нагружениях // Бетон и железобетон. 1985. № 1. С. 33–34.
- Яшин А. В. Некоторые данные о деформациях и структурных изменениях бетона при осевом сжатии // Новое о прочности железобетона. М.: Стройиздат, 1977. С. 17–30.
- Корчинский И. Л. Несущая способность материалов при немногочисленных повторных нагружениях // Методы расчёта зданий и сооружений на сейсмостойкость: сб. статей / под ред.

И. И. Гольденבלата и В. А. Быховского. М., 1958. С. 97–107.

9. Сергеев С. М., Беккер В. А., Безделев В. В. Моделирование напряженного состояния растворной части вокруг гранул крупного заполнителя бетона при действии на него внешней сжимающей нагрузки // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1982. № 5. С. 21–25.

10. Isojeh B., El-Zeghayar M., Vecchio F. J. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression // *Aci Materials Journal*. 2017. Vol. 114 (2). p. 225-235. <https://doi.org/10.14359/51689477>.

11. Gao L., Hsu T. C. C. Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading // *ACI Materials Journal*. 1998. Vol. 95 (5). p. 575-581.

12. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов: вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: АСВ, 2004. 560 с.

13. 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), June 18-23, 2017, Rhodes, Greece. Rhodes: International Congress on Fracture, 2017.

14. Liu F., Zhou J. Fatigue strain and damage analysis of concrete in reinforced concrete beams under constant amplitude fatigue loading // *Shock and Vibration*. 2016. Vol. 2016. p. 3950140. <https://doi.org/10.1155/2016/3950140>.

15. Cachim P. B., Figueiras J. A., Pereira P. A. A. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression // *Cement and Concrete Composites*. 2002. Vol. 24 (9). p. 211-217. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00019-1).

16. Paskova T., Meyer C. Low-cycle fatigue of plain and fiber reinforced concrete // *ACI Materials Journal*. 1997. Vol. 94 (4). p. 273-285.

17. Ramakrishnan V., Gollapudi S., Zellers R. Performance Characteristics and Fatigue of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete // SP-105. 1987. Vol. 105. p. 159-177.

REFERENCES

- Mikhailov KV (ed.). New on the strength of reinforced concrete. Moscow: Stroyizdat; 1977. 272 p. (In Russ.).
- Moskvitin VV. Cyclic loading of construction elements. Moscow: Nauka; 1981. 344 p. (In Russ.).
- Rastorguev BS, Tsepelev SV. Redistribution of efforts in reinforced concrete structures under low-cycle impacts. *Beton i zhelezobeton*. 1989;10: 16-18. (In Russ.).
- Rykov GV, Obedov VP, Mayorov EYu, Abramkina VT. Experimental studies of the processes of deformation and destruction of concrete under cyclic dynamic loads. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 1992;1:71-76. (In Russ.).
- Becheneva GV. Concrete strength under few repeated loads. *Issledovaniya po seismostoikosti zdaniy i sooruzhenii. Trudy TsNIISK*. 1961;6: 91-118. (In Russ.).
- Stavrov GN, Rudenko VV, Fedoseev AA. The strength and deformability of concrete under repeated static loading. *Beton i zhelezobeton*. 1985;1:33-34. (In Russ.).
- Yashin AV. Some information about the deformations and structural changes of concrete under axial compression. In: *Novoe o prochnosti zhelezobetona*. Moscow: Stroyizdat; 1977. p. 17-30. (In Russ.).
- Korchinsky IL. Bearing capacity of materials with few repeated loadings. In: Goldenblat II, Bykhovsky VA (eds.). *Metody rascheta zdaniy i sooruzhenii na seismostoikost'*: collection of articles. Moscow, 1958. p. 97-107. (In Russ.).
- Sergeev SM, Becker VA, Bezdelev VV. Modeling of the stress state of the mortar part around the granules of a large aggregate of concrete under the action of an external compressive load on it. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1982;5:21-25. (In Russ.).
- Isojeh B, El-Zeghayar M, Vecchio FJ. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression. *Aci Materials Journal*. 2017;114(2):225-235. <https://doi.org/10.14359/51689477>.
- Gao L, Hsu TCC. Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading. *ACI Materials Journal*. 1998;95(5):575-581.
- Rabinovich FN. *Composites based on dispersedly-reinforced concrete: Questions on theory and design, technology, constructions*. Moscow: ASV; 2004. 563 p. (In Russ.).
- 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)*, June 18-23, 2017, Rhodes, Greece. Rhodes: International Congress on Fracture; 2017.
- Liu F, Zhou J. Fatigue strain and damage analysis of concrete in reinforced concrete beams under constant amplitude fatigue loading. *Shock and Vibration*. 2016;2016:3950140. <https://doi.org/10.1155/2016/3950140>.
- Cachim PB, Figueiras JA, Pereira PAA. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression. *Cement and Concrete Composites*. 2002;24(9):211-217. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00019-1).

16. Paskova T, Meyer C. Low-cycle fatigue of plain and fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*. 1997;94(4):273-285.

17. Ramakrishnan V, Gollapudi S, Zellers R. Performance Characteristics and Fatigue of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. *SP-105*. 1987;105:159-177.

Информация об авторах

Б. И. Пинус,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры строительного
производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: pinus@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

И. Г. Корнеева,

кандидат технических наук, старший
преподаватель кафедры строительного
производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: kornee-inna@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6130-0195>

В. Д. Балхеева,

кандидат технических наук, доцент
кафедры промышленного и гражданского
строительства,
Восточно-Сибирский государственный
университет технологий и управления,
670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В,
стр. 1, Россия,
e-mail: zua1759@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6389-1435>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Пинус Б. И. несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 29.06.2022.
Одобрена после рецензирования 15.07.2022.
Принята к публикации 19.07.2022.

Information about the authors

Boris I. Pinus,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the
Department of Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: pinus@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

Inna G. Korneeva,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the
Department of Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: kornee-inna@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6130-0195>

Valentina D. Balheeva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the
Department of Industrial and Civil Engineering,
East Siberian State University of Technology and
Management,
building 1, 40V Klyuchevskaya St., Ulan-Ude,
670013, Russia,
e-mail: zua1759@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6389-1435>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article. Pinus B. I. bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

The article was submitted 29.06.2022.
Approved after reviewing 15.07.2022.
Accepted for publication 19.07.2022.