

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Научная статья


УДК 691.32

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-3/74-81>

Деформационная усталость фиброполипропиленбетона при динамических воздействиях

Инна Геннадьевна Корнеева , Борис Израилевич Пинус

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

 kornee-inna@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена экспериментальной оценке эффективности использования фибриллированных полипропиленовых волокон с целью повышения усталостного сопротивления цементно-содержащих матриц. Исследована кинетика деформаций обычного и фиброармированного полипропиленбетона при многократных циклических воздействиях с амплитудой напряжений $\eta = 0,6-0,8$ и нулевой асимметрией. Последствия динамических нагрузок анализируются по результатам статических испытаний на сжатие контрольных и опытных образцов при постоянстве скорости деформирования 0,04 мм/с. Сопоставление значимых показателей усталостного сопротивления выполнено с использованием многозвенных диаграмм, учитывающих физические закономерности трансформации деформирования на этапах возрастания и самопроизвольного падения нагрузок. Установлено, что фиброполипропиленбетон повышает усталостное внутреннее сопротивление цементно-содержащих матриц вследствие возрастания потенциала пластического деформирования и структурной модификации, способствующей снижению отклика на динамические воздействия.

Ключевые слова: фибробетон, полипропилен, деформативная усталость, циклические нагружения, динамические воздействия

Для цитирования: Пинус Б.И., Корнеева И.Г. Деформационная усталость фиброполипропиленбетона при динамических воздействиях // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 3(60). С. 74–81.


BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND STRUCTURES

Original article

Deformation fatigue fibroproliferative concrete under dynamic effects

Inna G. Korneeva , Boris I. Pinus

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

 kornee-inna@yandex.ru

Abstract. The work is devoted to an experimental evaluation of the effectiveness of using fibrillated polypropylene fibers to increase the fatigue resistance of cement-containing matrices. The kinetics of deformations of conventional and fiber-reinforced polypropylene concrete repeated cyclic impacts with a stress amplitude of $n = 0.6 - 0.8$ and zero asymmetry are studied. The consequences of dynamic loads are analyzed based on the results of static compression tests of control and experimental samples at a constant deformation rate of 0.04 mm/s. Comparison of significant fatigue resistance indicators was performed using multi-link diagrams that consider the physical regularities of deformation transformation at the stages of increasing and spontaneous load drop. It was found that fibro propylene concrete increases the internal fatigue resistance of cement-containing matrices due to an increase in the potential for plastic deformation and structural modification, which contributes to a decrease in the response to dynamic influences.

Keywords: fibroconcrete, polypropylene, deformative fatigue, cyclic loading, dynamic effects

For citation: Korneeva I.G., Pinus B.I. Deformation fatigue fibroproliferative concrete under dynamic effects. *School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 3(60), pp. 74–81. (In Russ.).

Эта работа является переводом оригинальной статьи, опубликованной на английском языке:

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 (ICCPAC 2020), 25-26 November 2020, Saint Petersburg, Russia / ed. by E. Rybnov, P. Akimov, M. Khalvashi, E. Vardanyan. CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group, London, 484 p. ISBN 978-1-032-00930-8. <https://doi.org/10.1201/9781003176428>

Введение

Возрастающее использование фибробетонов в конструктивных элементах автомобильных дорог, мостовых переходов, взлетно-посадочных полос и других сооружений, подвергаемых внешним воздействиям с большой амплитудой перепада нагрузок, определяют актуальность проектного обеспечения их усталостной прочности. При этом усталость цементно-матричных композитов рассматривается [1–4] как прогрессирующий неоднозначный процесс внутренних структурных трансформаций, обусловленных образованием, развитием и накоплением микротрещин. На макроуровне они проявляются в изменении нормируемых показателей конструктивных свойств и долговечности [5]. Их численные значения характеризуются большим разбросом и различной динамикой, что объяснимо наличием объективных и субъективных факторов. К первым относятся структурообразующие факторы (состав, технология, возраст и т.п.), вторые связаны с отсутствием единой методологии экспериментальных оценок. Применительно к фибробетонам, очевидно, дополнительно сказывается случайный неоднородный характер распределения волокон и их деформационная совместимость с компонентами матрицы.

Имеются экспериментальные данные [6, 7] об уникальных свойствах фибриллированного полипропилена, косвенно свидетельствующие о целесообразности его использования для армирования бетона. В частности, волокна обладают высокой прочностью и деформациями растяжения, что ведет к улучшению пластичности бетона и увеличению способности к поглощению энергии.

Методика экспериментальных исследований

В отсутствие нормативных функциональных моделей усталости цементно-матричных композитов эффективность использования полипропиленовых фибр в бетонах оценена экспериментально. При этом влияние внешней среды смоделировано циклическими воздействиями с априори заданными амплитудой (η) и асимметрией (ρ), а кинетика отклика конструкций отождествлена с изменениями значимых параметров внутреннего сопротивления. В качестве таковых в настоящей работе рассматриваются структура и величина деформаций на различных этапах осевого циклического сжатия.

Влияние фибриллированного армирования на усталостное сопротивление исследовано методом сравнительной оценки последствий тождественных циклических воздействий на призматические образцы ($100 \times 100 \times 400$ мм), изготовленные из обычного (серия «Б») и усиленного полипропиленовыми волокнами (серия «ФБ») бетонов. Стандартные образцы без волокон изготавливались из бетонной смеси, состав которой подобран по жесткости (5–10 с. по Вебе) по общепринятой методике (ГОСТ 27006-86. Бетоны. Правила подбора состава, «Рекомендации по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов» (к ГОСТ 27006-86) и характеризуется следующим соотношением Ц:П:Щ:В = 1:1,42:3,31:0,55. Расход портландцемента составляет 380 кг/м^3 .

Использованы фибры диаметром 0,8 мм и длиной 40 мм с объемным содержанием 1,5%. Фракционный состав и соотношение компонентов подобраны с учетом классических подходов [8] по формированию оптимальных структур дисперсных композитов по критериям деформационной совместимости и условиям требуемой анкеровки волокон. Выбор оптимального уровня армирования осуществлен на основании пробных испытаний на изгиб пяти серий составов фибробетона, с объемным содержанием волокон в диапазоне $0 \div 2\%$. Максимальный

эффект в сопротивлении фибробетона изгибу достигался при фиброармировании 1,5 % [9].

Технология изготовления и условия месячного хранения образцов соответствовали стандартным (ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам). Образцы выдерживались в формах в течение 3 суток после бетонирования при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ под защитной пленкой, затем распалубливались и хранились в течение 28 суток в камере нормального твердения $(20 \pm 2^\circ\text{C}$ и влажности воздуха $95 \pm 5\%$).

Выдерживание образцов до испытания (3–4 месяца) осуществлялось в обычных лабораторных условиях.

Режим динамических испытаний характеризуется:

- количеством циклов установленного уровня $N = 200$;
- уровнем максимальных нагрузений $\eta = 0,6; 0,7; 0,8$
- коэффициентом асимметрии цикла $\rho = 0$.

Количество образцов в отдельных режимах испытаний было различным (12–18 шт.) в зависимости от разброса показаний и необходимости обеспечения статистической достоверности. Уровень соответствия деформативных параметров внутреннего сопротивления нормальному распределению оценивался по критерию Колмогорова [10], как минимизирующего ошибки при обобщении экспериментальных данных ограниченного объема.

К моменту начала динамических испытаний проведены контрольные (калибровочные) проверки исходных параметров бетонов (табл. 1) и их ультразвуковая выбраковка. Они являлись базовыми показателями при назначении уровня циклического сжатия и амплитуды.

Таблица / Table 1

Исходные показатели прочности и деформативности
Initial indicators of strength and deformability.

Серия	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	Модуль, МПа	Границы R_{ev}	
				R_{crc}^0	R_{crc}^v
«ФБ»	2,298	35,79	22607	0,32	0,74
«Б»	2,325	43,57	26580	0,47	0,88

С учетом целевых задач исследования и установленных [11] физических закономерностей развития усталостных процессов в бетонах (фибробетонах) режим циклических воздействий был принят в пределах границ микроразрушений $R_{crc}^0 - R_{crc}^v$ с амплитудой $\eta = (0,6 - 0,8) R_b$ и нулевой асимметрией (ρ) цикла.

Динамические испытания выполнялись на испытательном комплексе Instron 5989 в жестком режиме изменения нагрузки (точность 1 кН) с регламентированной скоростью деформирования образца 0,04 мм/с. Оснащение оборудования позволяло осуществлять равномерное нагружение без предварительного центрирования и, как следствие, получать полные деформации материала. Весь процесс испытаний происходил в автоматическом режиме по задаваемой программе с записью продольных и поперечных деформаций с точностью $1 \cdot 10^{-5}$ е.о.д., модуля упругости, времени, затрачиваемой энергии и других показателей. Общий вид диаграмм циклических воздействий (ЦВ) и характерного отклика опытных образцов представлен на рисунке 1.

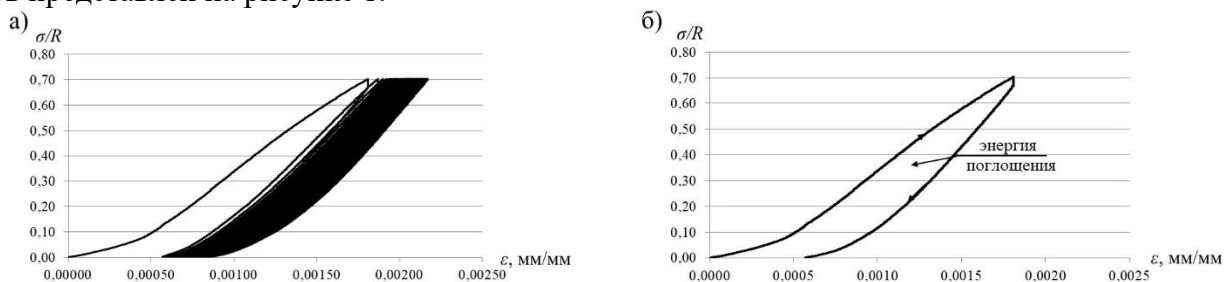


Рис. 1. Диаграммы нагружения (а) и отклика (б) образцов при динамических испытаниях

Fig. 1. Diagrams of loading (a) and response (b) of the sample during dynamic tests

Результаты и их обсуждение

Учитывая объективные различия в физических закономерностях поведения бетонов при циклических воздействиях и стандартизированных испытаниях, анализ деформативного отклика произведен раздельно. На этапах циклического режима нагружений деформация образцов ε рассматривается как двухкомпонентная (рис. 2а), состоящая из упругой (ε_e) и пластической (ε_{pl}) составляющей. Причем, в последнюю включены и остаточные деформации, отжидаемые на предыдущих циклах. Результаты последующих монотонных испытаний анализируются с использованием многозвенной модели (рис. 2б), наиболее адекватной полученным экспериментальным диаграммам сжатия и полные деформации материалов состоят из 4-х компонентов

$$\varepsilon_{b,ult} = \varepsilon_0 + \varepsilon_e + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{pl,u}$$

где ε_0 – начальные (остаточные в цикловом режиме) деформации, обусловленные начальным уплотнением структуры с положительными последствиями [12];

ε_e – упругие деформации, соответствующие условному модулю упругости E ;

ε_{pl} – пластические деформации, развитие которых связано с накоплением микротрещин;

$\varepsilon_{pl,u}$ – псевдопластические деформации, свидетельствующие о формировании макротрещин (трещин Гриффитса [12]) и условно ограниченные уровнем напряжений на нисходящей ветви равным $0,8\sigma_u$.

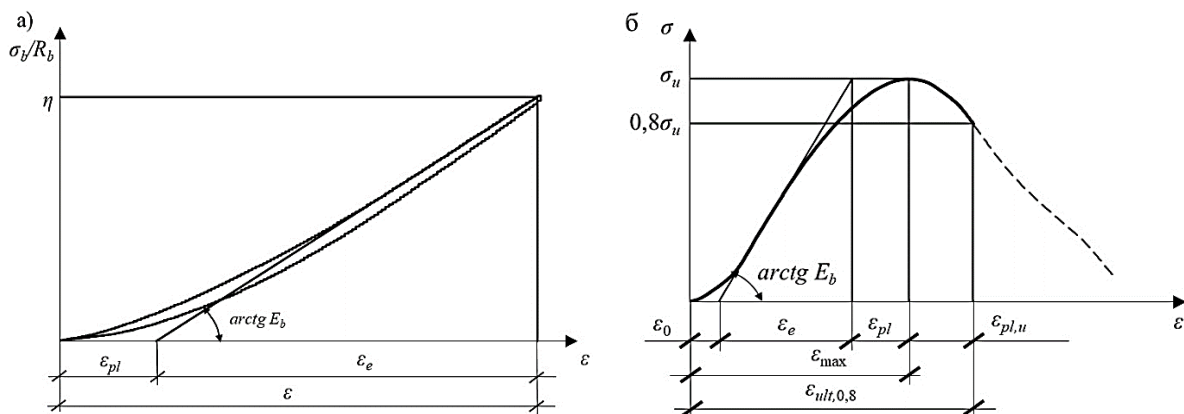


Рис. 2. Модели деформационного отклика при а) циклических воздействиях; б) монотонном сжатии

Fig. 2. Models of the deformation response under а) cyclic influences; б) monotonic compression

Деформационные отклики исследуемых составов на циклические воздействия характеризуются данными, представленными в таблице 2.

Из них следует, что при амплитуде $\eta < R_{crc}^v$ и нулевой асимметрии цикла величина продольных деформаций обычного и армированного фибробетона на принятой базе испытаний незначительно отличаются друг от друга. При $\eta = 0,8$ наблюдается преобладающий рост деформаций обычного бетона с разрушением части образцов в цикловом режиме.

Что касается структуры деформирования, то оба состава обладают высокой долей упругого отклика с большей тенденцией для ФБ. Это подтверждается и начальным увеличением с последующей стабилизацией модуля деформаций E и удельных деформаций ε/σ_{max} . Менее показательна на данном этапе динамика условно пластических деформаций ε_{pl} . На наш взгляд, это объяснимо их физической неоднородностью, так как опытные величины включают остаточные (цикловые) и деформации упруго-пластического последействия.

С точки зрения кинетики использования усталостного ресурса внутреннего сопротивления представляет интерес показатель модуля усталости [3], оцениваемого соотношением изменений уровня воздействия и соответствующего отклика. Если принять за исходный уровень амплитуды $\eta = 0,6$, то увеличение максимального нагружения составляет 17 и 34 % соответ-

венно для $\eta = 0,7$ и $0,8$. При этом относительный рост деформаций фибробетона аналогичен, а у обычного – превышает в 2 раза, причем, с возрастающей динамикой. То есть, дисперсное армирование способствует повышению усталостной стойкости к колебаниям внешних воздействий.

Таблица / Table 2

Кинетика структурных компонентов продольных деформаций при «ЦВ»
Kinetics of structural components of longitudinal deformations in «CV»

η	Показатель	Размерность	«Б» на цикле				«ФБ» на цикле			
			1	10	100	200	1	10	100	200
0,6	ε	%	1	0,92	0,91	0,90	1,04	1,04	1,06	0,98
	ε_e	%	0,76	0,60	0,58	0,59	0,94	0,71	0,70	0,71
	ε_{pl}	%	0,24	0,32	0,33	0,31	0,10	0,33	0,36	0,27
	E	ГПа	27,5	34,9	36,0	35,4	21,4	28,5	28,9	28,3
	ε/σ_u	%/ГПа	0,048	0,044	0,043	0,043	0,052	0,052	0,053	0,049
0,7	ε	%	1,03	1,02	1,07	1,17	1,00	1,11	1,13	1,09
	ε_e	%	0,85	0,66	0,69	0,65	0,94	0,86	0,85	0,87
	ε_{pl}	%	0,18	0,36	0,38	0,52	0,06	0,25	0,28	0,22
	E	ГПа	39,2	39,1	37,5	35,6	22,0	27,2	27,7	28,1
	ε/σ_u	%/ГПа	0,042	0,040	0,044	0,048	0,042	0,047	0,048	0,048
0,8	ε	%	1,22	1,38	1,56	Разр.	1,16	1,29	1,33	1,42
	ε_e	%	0,92	0,97	1,07	Разр.	1,03	1,01	1,09	1,02
	ε_{pl}	%	0,30	0,41	0,49	Разр.	0,13	0,28	0,24	0,40
	E	ГПа	32,0	30,4	27,6	Разр.	27,7	28,2	25,9	27,0
	ε/σ_u	%/ГПа	0,044	0,050	0,056	Разр.	0,043	0,048	0,050	0,053

Более обобщенная и нормативно адекватная оценка усталостных последствий динамических воздействий, представлена в виде сравнительного анализа диаграмм $\sigma - \varepsilon$ при монотонном сжатии контрольных и подвергнутых 200-м циклам с амплитудой $\eta = 0,6$ образцов. Рассматриваются параметры полных деформаций и их компонентов в соответствии с принятой (рис. 2б) многозвенной деформационной моделью (табл. 3).

Таблица / Table 3

Изменение параметров деформативности после «ЦВ»
The change in the parameters of deformability after «CV»

Индекс показателя	Размерность	Серия «Б»		Серия «ФБ»	
		Исходное состояние	После ЦВ	Исходное состояние	После ЦВ
σ_{max}	МПа	34,7	33,6	33,6	32,6
E	ГПа	26,9	33,2	22,6	27,1
ε_{max}	%	2,38	2,02	3,22	2,15
ε_{ult}	%	3,02	2,55	4,15	2,81
ε_0	%	0,37	0,18	0,39	0,23
ε_e	%	1,43	1,02	1,48	1,20
ε_{pl}	%	0,58	0,82	1,35	0,72
$\varepsilon_{pl, u}$	%	0,64	0,53	0,83	0,66
ε'_{max}	%	1,29	1,33	1,31	0,88
ν	б/р	0,40	0,66	0,57	0,48

Прежде всего, необходимо отметить практическую стабильность показателей прочности по истечении циклов динамических нагрузок. Очевидно, сказывается отмечавшаяся ранее [14] разнонаправленность (конструктивная и деструктивная) последствий усталостной трансформации структуры бетона и фибробетона. Деформативность является более чувствительным к «ЦВ» параметром. Установлен ощутимый прирост модуля деформаций E , свидетельствующий о формировании более плотных структур. Это подтверждается снижением значений деформаций ε_{\max} и ε_{ult} . Примечательно, что в абсолютном выражении деформативность фибробетона в исходном и постдинамическом состояниях остается большей, но ее снижение (более 30 %) отличается повышенной динамикой.

Представляет несомненный интерес внутрискруктурная трансформация деформаций. Как и следовало ожидать, снижаются деформации начального уплотнения ε_0 , частично отжатые при «ЦВ», и потенциал упругого деформирования. В большей степени это проявляется в обычных бетонах. Учитывая, что уровень циклического воздействия находился в диапазоне границ микроразрушения R_{crc} , сохраняемости упругого сопротивления фибробетона способствуют полипропиленовые волокна.

С учетом возможности практической реализации в конструктивных элементах потенциал пластического сопротивления рассматривается в соответствии с моделью (рис. 2б) отдельно для этапа возрастающей нагрузки ε_{pl} и последующего самопроизвольного разрушения ($\varepsilon_{pl,u}$). Примечательно, что в исходном состоянии ресурс пластического деформирования фибробетона на обоих участках существенно выше. После динамических воздействий наблюдается практическое равенство общей пластичности при различии структуры деформаций. На наш взгляд, сказывается принятое ограничение оценки деформаций за максимумом ($0,8\sigma_u$) что практически совпадает с моментом обрыва диаграммы обычного бетона. Фибробетонам свойственна [14, 10] более пологая и удлиненная нисходящая ветвь стесненного деформирования и, следовательно, пластичность разрушения.

Более вязкий характер разрушения фибробетона подтверждается кинетикой поперечных деформаций ε' при максимальной нагрузке и коэффициента Пуассона. После динамических воздействий имеется 1,5 кратный рост последнего у обычных бетонов и снижение (более 15 %) у фибропропиленбетона.

Выводы

1. Усталостная деградация бетона и фибропропиленбетона характеризуется первоначальной преимущественной трансформацией их деформативных свойств.
2. Дисперсное армирование с использованием фибриллированных полипропиленовых волокон способствует увеличению усталостного внутреннего сопротивления цементно-содержащих матриц вследствие возрастания потенциала их пластического деформирования.
3. Полипропиленфибробетоны характеризуются повышенным модулем усталости, оцениваемым сравнительно меньшей динамикой отклика на повышение амплитуды внешнего воздействия.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Murdock J., Kesler C.E. The mechanism of fatigue in concrete // Report № 587. University of Illinois, August. 1960.

2. Wang H.L., Song Y.P. Fatigue capacity of plain concrete under fatigue loading with constant confined stress // *Materials and Structures*. 2011. Vol. 44. P. 253–262. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9624-6>
3. 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. P. 211–217. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465-\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465-(01)00019-1)
4. Matsumoto T., Li V.C. Fatigue life analysis of fiber reinforced concrete with a fracture mechanics based model // *Cement and Concrete Composites*. 1999. Vol. 21(4). P. 249–261. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00004-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00004-9)
5. Susmel L. A unifying methodology to design un-notched plain and short-fibre/particle reinforced concretes against fatigue // *International Journal of Fatigue*. 2014. Vol. 61. P. 226–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.11.006>
6. Ramakrishnan V., Gollapudi S., Zellers R. Performance Characteristics and fatigue Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete // In *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*. American Concrete Institute SP-105. Detroit, Mich, 1987. P. 159–177.
7. Ramakrishnan V. Materials and properties Fiber Reinforced Concrete // *Fiber Reinforced Concrete: Proceedings International Simposiun, Madras, India, Dec. 21, 1987*. Berlin, New York, Springer-Verlag, 1989. 234 p.
8. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. Москва: АСВ, 2011. 642 с.
9. Korneeva I.G. Extensibility of the fibre concrete // *Investments, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities: Proceedings of conference, Irkutsk, Russian Federation, April 25, 2019*. IOP Publishing Ltd, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012044>
10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва: Высшая школа, 1999. 576 с.
11. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. Москва: Стройиздат, 1996. 407 с.
12. Зайцев Ю.В. Моделирование деформации и прочности бетона методами механики разрушения. Москва: Стройиздат, 1982. 196 с.
13. Chen Y., Chen X., Bu J. Nonlinear damage accumulation of concrete subjected to variable amplitude fatigue loading // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2018. Vol. 66. № 2. P. 157–163. <https://doi.org/10.24425/119070>
14. Korneeva I.G., Pinus B.I. Deformation fatigue fibroproliferative concrete under dynamic effects // *Contemporary Problems of Architecture and Construction: Proceedings of conference, Saint Petersburg, Russia, November 26–26, 2020*. London: Taylor & Francis Group, 2021. 484 p. <https://doi.org/10.1201/9781003176428>.

REFERENCES

1. Murdock J., Kesler C.E. The mechanism of fatigue in concrete. *Report No. 587*. University of Illinois, August, 1960.
2. Wang H.L., Song Y.P. Fatigue capacity of plain concrete under fatigue loading with constant confined stress. *Materials and Structures*, 2011, vol. 44, pp. 253–262. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9624-6>
3. 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, pp. 211–217. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00019-1)
4. Matsumoto T., Li V.C. Fatigue life analysis of fiber reinforced concrete with a fracture mechanics based model. *Cement and Concrete Composites*, 1999, vol. 21(4), pp. 249–261. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00004-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00004-9)
5. Susmel L. A unifying methodology to design un-notched plain and short-fibre/particle reinforced concretes against fatigue. *International Journal of Fatigue*, 2014, vol. 61, pp. 226–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.11.006>
6. Ramakrishnan V., Gollapudi S., Zellers R. Performance Characteristics and fatigue Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. In *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*. American Concrete Institute SP-105, Detroit, Mich, 1987, pp. 159–177.
7. Ramakrishnan V. Materials and properties Fiber Reinforced Concrete. *Fiber Reinforced Concrete: Proceedings International Simposiun, Madras, India, Dec. 21, 1987*. Berlin, New York, Springer-Verlag, 1989. 234 p.

8. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction. Moscow, ASV Publ., 2011. 642 p. (In Russ.).
9. Korneeva I.G. Extensibility of the fibre concrete. *Investments, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities: Proceedings of conference, Irkutsk, Russian Federation, April 25, 2019*. IOP Publishing Ltd, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012044>
10. Wentzel E.S. Probability theory: Studies for universities. Moscow, Higher School Publ., 1999. 576 p. (In Russ.).
11. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow, Ctrojizdat Publ., 1996. 407 p. (In Russ.).
12. Zaitsev Yu.V. Modeling of deformation and strength of concrete by methods of fracture mechanics. Moscow, Ctrojizdat Publ., 1982. 196 p. (In Russ.).
13. Chen Y., Chen X., Bu J. Nonlinear damage accumulation of concrete subjected to variable amplitude fatigue loading. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 2018, vol. 66, no. 2, pp. 157–163. <https://doi.org/10.24425/119070>
14. Korneeva I.G., Pinus B.I. Deformation fatigue fibroproliferative concrete under dynamic effects. *Contemporary Problems of Architecture and Construction: Proceedings of conference, Saint Petersburg, Russia, November 26–26, 2020*. London, Taylor & Francis Group, 2021. 484 p. <https://doi.org/10.1201/9781003176428>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Корнеева Инна Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры строительное производство, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Российская Федерация)

✉ kornee-inna@yandex.ru, SPIN: 6916-8828, <https://orcid.org/0000-0001-6130-0195>

Inna G. Korneeva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Building Production, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

Пинус Борис Израилевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного производства, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Российская Федерация)

✉ pinusb@list.ru, SPIN: 9185-8215, <https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>.

Boris I. Pinus, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Building Production, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию / Received: 08.07.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 03.09.2024.

Принята к публикации / Accepted: 20.09.2024.