

Известия вузов. Строительство. 2022. № 10. С. 14–22.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (10): 14–22.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.327:678.06

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-14-22

## ДЕФОРМАЦИОННО-УПРОЧНЯЮЩИЕСЯ ФИБРОКОМПОЗИТЫ ГИДРАТАЦИОННОГО ТВЕРДЕНИЯ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ, ПРИНЦИПЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

**Ольга Михайловна Смирнова<sup>1</sup>, Алексей Михайлович Харитонов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния микрофибры на основе полиэтилена высокой плотности и полибензоксазола на осевое растяжение фиброкомпозитов. Предложено определение явления деформационного упрочнения фиброкомпозита гидратационного твердения. Получены и проанализированы характерные диаграммы деформирования различных фибраармированных композитов. Определены диапазоны величин деформационного упрочнения и пластической деформации, а также установлены факторы, обуславливающие эти характеристики. С практической точки зрения рост сопротивления фиброкомпозита с сохранением его целостности в условиях высоких значений пластических деформаций открывает возможность использования подобных материалов для ремонта поврежденных пролетных строений и перекрытий, долговечной (тепло- и биостойкой) герметизации стыков сборных железобетонных конструкций.

**Ключевые слова:** деформационное упрочнение, пластическая деформация, микрофибра, кривая деформирования, микротрещинообразование, полиэтилен высокой плотности, полибензоксазол

**Для цитирования:** Смирнова О.М., Харитонов А.М. Деформационно-упрочняющиеся фиброкомпозиты гидратационного твердения: определение, принципы получения и перспективы применения // Известия вузов. Строительство. 2022. № 10. С. 14–22. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-14-22.

Original article

## DEFORMATION-HARDENING FIBER COMPOSITES: DEFINITION, PRINCIPLES OF PREPARATION AND PROSPECTS OF APPLICATION

**Olga M. Smirnova<sup>1</sup>, Aleksey M. Kharitonov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** The article presents the results of a study of the effect of microfiber based on high-density polyethylene and polybenzoxazole on the axial stretching of fibrocomposites. The definition of the phenomenon of deformation hardening of a hydration hardening

fibrocomposite is proposed. Characteristic deformation diagrams of various fiber-reinforced composites are obtained and analyzed. The ranges of values of deformation hardening and plastic deformation are determined, as well as the factors that determine these characteristics are stated. From a practical point of view the increase of the resistance of fibrocomposite while maintaining its integrity in conditions of high values of plastic deformations opens up the possibility of using such materials for repairing damaged superstructures and ceilings, durable (heat and bio-resistant) sealing of joints of precast reinforced concrete structures.

**Keywords:** deformation hardening, plastic deformation, microfiber, deformation curve, microcracking, high density polyethylene, polybenzoxazole

**For citation:** Smirnova O.M., Kharitonov A.M. Deformation-hardening fiber composites: definition, principles of preparation and prospects of application. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2022; (10): 14–22. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-14-22.

**Введение.** Одним из отличительных признаков фибробетонов является их более высокая деформативность. Для детального изучения изменения характера поведения бетона под нагрузкой при дисперсном армировании синтетической макрофиброй использованы диаграммы деформирования при растяжении с изгибом (рис. 1). Так, в случае небольшого расхода фибры величина нагрузки, которая передается от матрицы на волокна после образования магистральной трещины, уменьшается в несколько раз по сравнению с разрушающей нагрузкой для матрицы (рис. 1, расход фибры 3 и 5 кг/м<sup>3</sup>).

При анализе кривых деформирования фибробетонов с повышенным расходом фибры (рис. 1, расход макрофибры 7 кг/м<sup>3</sup>) следует обратить внимание на наличие двух характерных пиков. Первый максимум на кривой соответствует наибольшей нагрузке, которую способна выдержать матрица, и отражает работу фибробетона на этапе упругого деформирования. Второй пик относится к предельной нагрузке, воспринимаемой волокнами

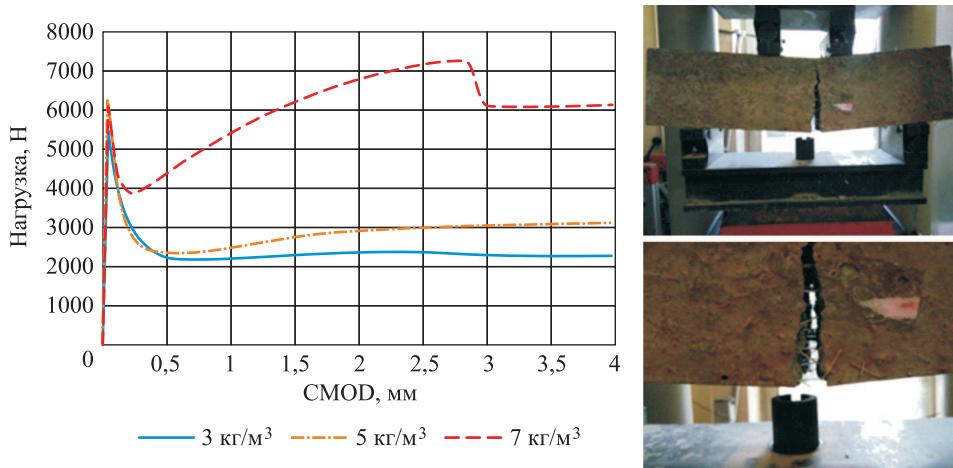


Рис. 1. Кривые деформирования при изгибе фиброкомпозитов с различным расходом синтетической макрофибры

Fig. 1. Deformation curves in bending the fibrocomposites with different amount of synthetic macrofiber

после образования магистральной трещины в матрице, и характеризует работу материала с трещиной [1–4]. При высокой степени дисперсного армирования ( $7 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) даже после образования макротрещины проявляется эффект упрочнения композита, сопровождающийся активным нарастанием пластических деформаций. Пластические деформации обусловлены развитием магистральной трещины вплоть до момента разрушения образца (рис. 1, фото).

В этой связи особый интерес представляют дисперсно-армированные бетоны, в которых за счет вовлечения в работу фибры по мере увеличения нагрузки значительно нарастают пластические деформации, но при этом сохраняется как несущая способность, так и целостность образца. К данному явлению в полной мере, на наш взгляд, относится понятие деформационного упрочнения.

У полимерных материалов и металлов деформационное упрочнение обусловлено стеснением продвижения массивов дислокаций при пластической деформации. В отношении фиброкомпозитов гидратационного твердения существующее определение требует уточнения. Деформационным упрочнением композита под нагрузкой является процесс повышения напряжений в зоне пластических деформаций композита без появления магистральных трещин. В этом случае пластические деформации обусловлены микротрещинообразованием, отличительным признаком которого является появление значительного количества микротрещин, ширина раскрытия которых чрезвычайно мала, что позволяет говорить о сохранении целостности материала. Важно при этом обеспечить увеличение зоны микротрещинообразования и уменьшение зоны макротрещинообразования на диаграмме деформации.

С практической точки зрения повышение несущей способности фиброкомпозита с сохранением его целостности в условиях высоких значений пластических деформаций открывает возможность использования подобных материалов для эффективного ремонта поврежденных пролетных строений и перекрытий, долговечной (тепло- и биостойкой) герметизации стыков сборных железобетонных конструкций.

Исходя из вышесказанного, требуется выявить условия, при которых возможно значительное деформационное упрочнение при пластическом формировании фиброкомпозита под нагрузкой. Ранее было установлено, что рост трещины способна сдерживать фибра, диаметр которой сопоставим с шириной трещины [5–9]. Таким образом, представляется целесообразным использование микрофибры для повышения удельной работы микротрещинообразования и соответственно достижения эффекта деформационного упрочнения при значительных пластических деформациях. Также необходимо принимать во внимание величину жесткости фибры, которая во многом определяет способность дисперсного армирования сдерживать развитие трещин [10].

**Материалы и методы исследования.** Для поисковых исследований были выбраны два вида микрофибры: на основе полиэтилена высокой плотности и полибензоксазола. Характеристики фибры представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики синтетических микрофибр

Table 1. Characteristics of synthetic microfibres

Параметр	Вид фибры (торговая марка)	
	Dyneema	Zylon
Материал фибры	Полиэтилен высокой плотности (HDPE)	Полибензоксазол (PBO)
Средний диаметр, мкм	20	13
Длина, мм	6	6
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,97	1,54
Предел прочности на одноосное растяжение, МПа	25	5800
Модуль упругости, ГПа	1,2	180
Относительное удлинение при разрыве, %	700	3,5
Температура плавления, °C	150	650
Поверхность микрофибры	Гидрофобная	Гидрофильная

При проектировании фибробетонов, способных к деформационному упрочнению, необходимо стремиться к тому, чтобы на участке кривой деформирования между двумя пиками отсутствовало резкое снижение напряжений, указывающее на образование трещин с относительно большим раскрытием.

Существенные отличия в физико-механических свойствах матрицы, заполнителя и фибры обусловливает наличие выраженной границы раздела между элементами структуры. Так как пластические деформации и деформационное упрочнение фиброкомпозита предполагает активное микротрецинообразование, то площадь раздела «матрица–фибра» должна многократно превосходить площадь раздела «матрица–заполнитель». Ввиду этого, при разработке составов цементных матриц потребовалось полностью исключить крупный заполнитель и сократить количество и размер зерен мелкого заполнителя, а расход микрофибры увеличить [11–13].

Исследование по определению механических свойств выполнено с помощью сервогидравлической системы MTS 816. Оборудование позволяет проводить испытания образцов на одноосное растяжение (рис. 2, фото). Три образца были испытаны для каждого состава в возрасте 28 дней.

**Результаты испытаний и обсуждение.** На рис. 2 представлены диаграммы деформирования при осевом растяжении фиброкомпозитов в возрасте 28 сут. Все составы имели цементную матрицу, полученную по принципу реакционно-порошкового бетона с пределом прочности на сжатие около 100 МПа, расход микрофибры был принят также неизменным – 2 % по объему, отличия заключались только в виде материала микрофибры.

Результаты испытаний, полученные графическим методом по диаграммам деформирования (рис. 3) при анализе поверхности образцов после разрушения, представлены в табл. 2.

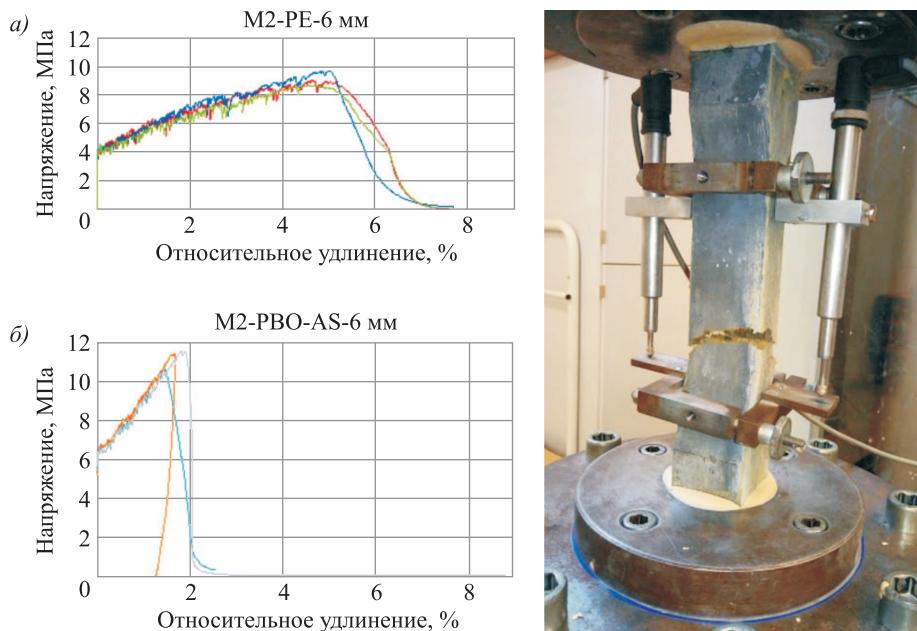


Рис. 2. Диаграммы деформирования при осевом растяжении фиброкомпозитов с микрофиброй на основе полиэтилена высокой плотности (а) и полибензоксазола (б)

Fig. 2. Deformation diagrams in axial stretching of fibrocomposites with microfiber based on high-density polyethylene (a) and on polybenzoxazole (b)

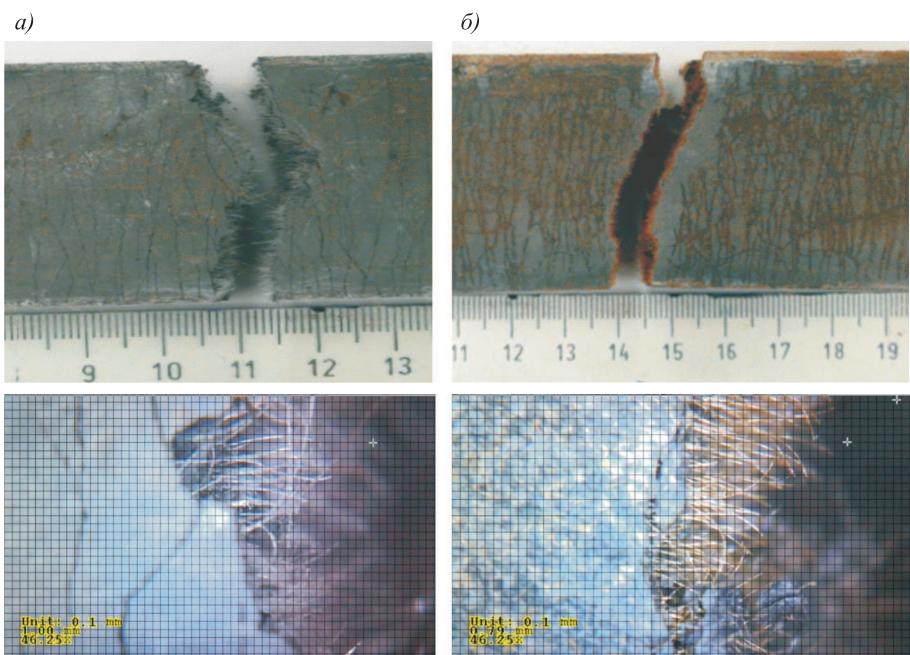


Рис. 3. Особенности поверхностей образцов с HDPE-микрофиброй (а) и с PBO-микрофиброй (б) после разрушения

Fig. 3. Features of surfaces of sample with HDPE microfiber (a) and with PBO microfiber (b) after destruction

**Таблица 2. Результаты испытаний фиброкомпозитов при одноосном растяжении в возрасте 28 сут**

**Table 2. Test results of fibrocomposites under uniaxial tension at the age of 28 days**

Параметр	Вид микрофибры	
	HDPE (6 мм)	PBO (6 мм)
Предел упругости (напряжение первой микротрещины), МПа	3,8	6,5
Относительное удлинение до появления первой микротрещины, %	0,021	0,026
Предел прочности при одноосном растяжении, МПа	9,1	11,1
Максимальное относительное удлинение, %	4,77	1,64
Деформационное упрочнение, МПа	5,3	4,6
Количество микротрещин ( $n$ ), шт.	63	76
Среднее значение ширины микротрещин разгруженного образца ( $b$ ), мкм	55	20
Удлинение за счет микротрещинообразования ( $n \times b$ ), мм	3,465	1,52

Повышение предела упругости фиброкомпозита с PBO-микрофиброй (6,5 МПа) по отношению к составу с HDPE-микрофиброй (3,8 МПа) можно объяснить более высокой прочностью и модулем упругости волокон из полибензоксазола. Повышению предела упругости в этом случае также способствует гидрофильная поверхность PBO-фибры, что обеспечивает ее лучшее заанкеривание в цементной матрице.

Предел прочности, соответствующий разрушению образцов, составил 9,1 и 11,1 МПа, деформационное упрочнение (разница между пределом прочности и пределом упругости) – 5,3 и 4,6 МПа для HDPE- и PBO-микрофибры соответственно. Таким образом, деформационное упрочнение составило 139 % по отношению к пределу упругости для композита с HDPE-микрофиброй и 70 % – для композита с PBO-микрофиброй.

Обращает на себя внимание значительное различие в величине максимального относительного удлинения фиброкомпозитов, которое составляет 4,77 % для композита с HDPE-микрофиброй и 1,64 % с PBO-микрофиброй. Следовательно, можно говорить об отличии пластической деформации почти в 3 раза. Это объясняется в первую очередь разным относительным удлинением при разрыве самих волокон, которое составляет 700 и 3,5 % для HDPE- и PBO-микрофибры соответственно. В связи с этим более выражено растягивание HDPE-микрофибры, сдерживающей раскрытие микротрещины. На этот факт также указывает величина усредненного значения ширины микротрещин разгруженного образца с HDPE-микрофиброй, которое составило 55 мкм, что больше, чем у образцов с PBO-микрофиброй (20 мкм).

При визуальном исследовании поверхностей образцов после разрушения (см. рис. 3) отмечено, что HDPE-волокна в основном растянуты и оборваны, а PBO-волокна в большей части выдернуты из матрицы. При совместной работе матрицы и PBO-волокон образовалось большее количество микротрещин.

Дополнительно к указанному ранее, крепление горных выработок может быть одной из важнейших областей применения подобных композитов. При использовании дисперсно-армированного торкрет-бетона для крепления горной выработки его эффективность в условиях сложного нагружения обусловлена изотропностью деформационно-механических свойств материала при объемном армировании [14, 15].

**Выводы.** Таким образом, содержание в тонкозернистой цементирующей матрице синтетической микрофибры на основе полиэтилена высокой плотности или бензоксазола в количестве 2 % от объема способно обеспечить деформационное упрочнение композита при его пластическом деформировании. Свойство деформационного упрочнения фиброкомпозита гидратационного твердения можно определить как повышение сопротивления материала при пластической деформации, сопровождающейся микротрецинообразованием с сохранением целостности материала.

Величина пластической деформации композита зависит от ширины раскрытия и количества микротрещин, а также относительного удлинения самой микрофибры. На абсолютную величину деформационного упрочнения незначительное влияние оказывают механические свойства синтетической микрофибры, а именно такие факторы, как предел прочности при одноосном растяжении, модуль упругости, а также прочность контактной зоны между матрицей и фиброй, обусловленная величиной смачивания поверхности фибры. Безусловно, требуется продолжение исследований, направленных на выявление ключевых факторов, определяющих величину деформационного упрочнения.

#### **Список источников**

1. Пухаренко Ю.В., Морозов В.И., Пантелейев Д.А., Жаворонков М.И. Диаграммы разрушения цементных композитов, армированных аморфнометаллической фиброй // Эксперт: теория и практика. 2020. № 3. С. 50–55.
2. Пухаренко Ю.В., Жаворонков М.И., Пантелейев Д.А. Совершенствование методов определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фибробетона // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14, № 3. С. 301–310.
3. Петров Д.Н. Определение прочностных показателей бетонов с полимерной фиброй // Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 236–239.
4. Belyakov N., Smirnova O., Alekseev A., Tan H. Numerical simulation of the mechanical behavior of fiber-reinforced cement composites subjected dynamic loading // Applied sciences. 2021. Vol. 11, no. 3. P. 1112.
5. Пухаренко Ю.В., Ахметов Д.А., Морозов В.И., Кострикин М.П. Эффективность использования низкомодульных синтетических волокон в составе аэродромных плит // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2021. № 3. С. 42–52.
6. Heravi A.A., Mechtcherine V., Smirnova O. Effect of strain rate and fiber type on tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) // RILEM Bookseries. 2018. Vol. 15. P. 266–274.
7. Пухаренко Ю.В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2004. 46 с.
8. Коротких Д.Н., Чернышов Е.М. Критериальная оценка конструкционного потенциала и технико-экономической эффективности современных цементных бетонов // Технологии бетонов. 2016. № 1-2. С. 49–52.

9. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Определяющие соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры // Строительство и реконструкция. 2015. № 2. С. 167–174.
10. Пухаренко Ю.В., Пантелейев Д.А., Жаворонков М.И. Анализ поведения фибробетона, армированного различными видами фибры, под нагрузкой // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году: Сб. науч. тр. РААСН. Т. 2. М.: Изд-во АСВ, 2022. С. 358–363.
11. Смирнова О.М., Харитонов А.М., Казанская Л.Ф. Технологические аспекты приготовления растворных смесей высоконаполненных полипропиленовой микроволокнистыми цементными композитов // Бюллетень строительной техники. 2022. № 8. С. 26–28.
12. Smirnova O.M. Low-clinker cements with low water demand // Journal of Materials in Civil Engineering. 2020. Vol. 32, no. 7. P. 06020008.
13. Ахметов Д.А., Пухаренко Ю.В., Роом Е.Н., Ахажанов С.Б. Влияние мелкодисперсных наполнителей из техногенных отходов и низкомодульного фибролокна на удобоукладываемость самоуплотняющихся бетонов // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 5. С. 102–108.
14. Тулин П.К., Очкуров В.И., Шубин А.А., Сотников Р.О. Методика определения свойств дисперсно-армированного бетона // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 8. С. 129–14.
15. Карапеев М.А., Сотников Р.О. Прогноз напряженного состояния набрызг-бетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии // Записки Горного института. 2021. Т. 251, № 5. С. 626–638.

## References

1. Pukharenko Yu.V., Morozov V.I., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Diagrams of destruction of cement composites reinforced with amorphous metallic fiber. *Eksperiment: teoriya i praktika = Expert: theory and practice*. 2020; (3): 50–55. (In Russ.).
2. Pukharenko Yu.V., Zhavoronkov M.I., Panteleev D.A. Improvement of methods for determining the strength and energy characteristics of the crack resistance of fibroblast. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*. 2019; 14 (3): 301–310. (In Russ.).
3. Petrov D.N. Determination of strength indicators of concrete with polymer fiber. *Zapiski Gornogo instituta = Notes of the Mining Institute*. 2013; (204): 236–239. (In Russ.).
4. Belyakov N., Smirnova O., Alekseev A., Tan H. Numerical simulation of the mechanical behavior of fiber-reinforced cement composites subjected dynamic loading. *Applied Sciences*. 2021; 11(3): 1112.
5. Pukharenko Yu.V., Akhmetov D.A., Morozov V.I., Kostrikin M.P. Efficiency of using low-modulus synthetic fibers as part of airfield plates. *ALITinform: Tsement. Beton. Sukhie smesi = ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes*. 2021; (3): 42–52. (In Russ.).
6. Heravi A.A., Mechtcherine V., Smirnova O. Effect of strain rate and fiber type on tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC). *RILEM Bookseries*. 2018; (15): 266–274.
7. Pukharenko Yu.V. Scientific and practical foundations of the formation of the structure and properties of fiber-reinforced concrete: Abstract diss. ... DSc. St. Petersburg, 2004. 46 p. (In Russ.).
8. Korotkikh D.N., Chernyshov E.M. Criterion assessment of the structural potential and technical and economic efficiency of modern cement concretes. *Tekhnologii betonov = Concrete technologies*. 2016; (1-2): 49–52. (In Russ.).

9. Chernyshov E.M., Korotkikh D.N. Determining ratios of indicators of resistance to destruction of cement concretes and parameters of their structure. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Construction and reconstruction.* 2015; (2): 167–174. (In Russ.).
10. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Analysis of the behavior of fiber reinforced concrete reinforced with various types of fiber under load. Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021: Collection of scientific papers of the RAASN. Vol. 2. Moscow, 2022. P. 358–363. (In Russ.).
11. Smirnova O.M., Kharitonov A.M., Kazanskaya L.F. Technological aspects of the preparation of mortar mixtures of highly filled polypropylene microfiber cement composites. *Byulleten' stroitel'noy tekhniki = Bulletin of Construction Machinery.* 2022; (8): 26–28. (In Russ.).
12. Smirnova O.M. Low-clinker cements with low water demand. *Journal of Materials in Civil Engineering.* 2020; 32(7): 06020008.
13. Akhmetov D.A., Pukharenko Yu.V., Root E.N., Akhazhanov S.B. The influence of fine-grained fillers from man-made waste and low-modulus fiber on the workability of self-compacting concrete. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers.* 2021; (5): 102–108. (In Russ.).
14. Tulin P.K., Ochkurov V.I., Shubin A.A., Sotnikov R.O. Methodology for determining the properties of dispersed reinforced concrete. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and Analytical bulletin.* 2021; (8): 129–141. (In Russ.).
15. Karasev M.A., Sotnikov R.O. Forecast of the stress state of the spray-concrete support under repeated seismic impact. *Zapiski Gornogo instituta = Notes of the Mining Institute.* 2021; 251(5): 626–638. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

**О.М. Смирнова** – кандидат технических наук, доцент, smirnovaolgam@rambler.ru  
**А.М. Харитонов** – доктор технических наук, доцент, peepdv@mail.ru

#### **Information about the authors**

**O.M. Smirnova** – PhD, Ass. Professor, smirnovaolgam@rambler.ru  
**A.M. Kharitonov** – DSc, Ass. Professor, peepdv@mail.ru

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.08.2022  
Одобрена после рецензирования 14.09.2022  
Принята к публикации 21.09.2022

The article was submitted 14.08.2022  
Approved after reviewing 14.09.2022  
Accepted for publication 21.09.2022