

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НАНОФИБРОБЕТОНА НА РАСТЯЖЕНИЕ С КОМПЛЕКСНЫМ ФИБРОВЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Е. А. Коледа¹, С. Н. Леонович², С. А. Жданок³

¹Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь),

²Белостокский технический университет (г. Белосток, Польша),

³Национальная академия наук Республики Беларусь (г. Минск)

Аннотация. Бетоны – это иерархически организованные многоуровневые структуры дисперсных систем. Считается, что в бетоне всегда присутствуют некоторые начальные трещины (дефекты), с которых и начинается развитие магистральной трещины. Повышение вязкости разрушения бетона (его трещиностойкость) может достигаться за счет не только одноуровневого (традиционного), но и многоуровневого дисперсного армирования его структуры, рассматриваемого как средство торможения трещин на соответствующих структурных уровнях различного масштаба: крупнозернистом бетоне, мелкозернистом бетоне, цементном микробетоне, цементирующем веществе. На уровне цементирующего вещества армирование трещин достигается введением углеродных нанотрубок, которые благодаря своей геометрической форме могут легко перекрывать наноразмерные трещины. На макроуровне армирующим веществом выступает дисперсное армирование фибровым высокомолекулярным волокном, которое способно тормозить процесс образования магистральной трещины. Применение многоуровневого дисперсного армирования структуры с целью повышения трещиностойкости может создать предпосылки для получения бетонов нового поколения с более широкими их функциональными возможностями. Бетоны с многоуровневым дисперсным армированием окажутся востребованными в тех областях, где необходимы повышенная трещиностойкость, прочность на растяжение, высокая ударная вязкость и износостойкость. Дисперсное многоуровневое армирование бетонной матрицы может способствовать принципиальному изменению условий и энергетики образования трещин в структуре материала.

В статье приведены результаты испытаний нанофибробетонных образцов-балочек на прочность при осевом растяжении, прочность на растяжение при раскалывании, прочность на сжатие. Для исследования были приняты четыре состава бетонных смесей-матриц. В состав бетонной матрицы вводилась смесь из различных типов фибр макроуровня и наноуровня. Армирование на макроуровне обеспечивалось следующими видами фибр: стальная анкерная проволочная 50 мм и 12 мм, стальная прямая из проволоки 12 мм, базальтовая и полипропиленовая. На наноуровне в качестве армирующих волокон использовались углеродные нанотрубки. Согласно полученным результатам, прочность полученного нанофибробетона на осевое растяжение увеличивается на 4-45 %, на растяжение при раскалывании – на 42-108 %.

Ключевые слова: фибробетон; нанофибробетон; прочность на осевое растяжение; прочность на растяжение при раскалывании; прочность на сжатие; фибра; нанотрубки; наноструктурированный углерод.

Введение. На рынке стройматериалов все чаще предлагают такой материал, как фибробетон. Он представляет собой бетон, который в своем составе имеет частицы фиброволокна. Эти волокна исполняют роль дисперсной арматуры, которая применяется с целью повышения прочности бетонной матрицы. Фибробетонные вкрапления одинаковы по

длине и толщине, что позволяет равномерно распределить их во всей структуре бетона. В литературных источниках указывается обширный перечень преимуществ фибробетона: более высокая прочность на растяжение и разрыв, повышенный модуль упругости, устойчивость к химическим веществам и атмосферному воздействию, морозостойкость и

пожаропрочность, отсутствие усадки, устойчивость к трещинообразованию, водонепроницаемость, стойкость к истиранию, высокая ударопрочность и др.

Целью исследования является оценка влияния фибрового армирования различных типов матриц и видов фибровых волокон на прочность на растяжение при раскалывании, на осевое растяжение, прочность на сжатие.

Условия и описание методики проведения исследования. В строительной лаборатории Представительства акционерного общества Инжиниринговая компания «АСЭ» (Российская Федерация) в Республике Беларусь, которая соответствует критериям Национальной системы аккредитации Республики Беларусь и аккредитована на соответствие требованиям СТБ ИСО/МЭК 17025-2007, на аккредитованном оборудовании проводились испытания нанофиброармированных бетонных смесей. Для испытаний были изготовлены образцы-балочки размером 70×70×280 мм в соответствии с требованиями [1-3].

В исследованиях использовались: вяжущее вещество портландцемент марки 500-Д20 (ГОСТ 10178) (ОАО «Красносельскстройматериалы» филиала №1 «Цементный завод») активностью – 32,2 МПа, нормальной густоты 26,25 %;

- сульфоалюминатная добавка РСАМ по СТБ 2092-2010 (ООО «ПарадСтройХим»);
- микрокремнезем конденсированный

уплотненный (МКУ-85) по ТУ 5743-048-02495332-96 (ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат»; поставщик ООО «Тривойт» г. Минск);

- мелкий заполнитель – песок для строительных работ по ГОСТ 8736 (карьер «Запольское» г. Островец, КУП «Гроднооблдорстрой») с модулем крупности – 2,0;
- крупный заполнитель – щебень гранитный по ГОСТ 8267-93 (РУП «Гранит», г. Микашевичи) фракции 5-10 мм и 5-20 мм;
- вода для затворения и последующего твердения бетона, соответствующая требованиям СТБ 1114 и ГОСТ 23732;
- пластифицирующая добавка в бетон по ТУ 20.59.59-003-90784962-2018, содержащая модификатор на основе углеродных наноструктурированных материалов по ТУ 20.13.21-001-90784962-2018 (ООО «АМС Групп», г. Санкт-Петербург);
- фибра базальтовая длиной 12 мм (ТОВ «Технобазальтінвест», Украина; поставщик ИП КОВАЛЕВ Н.Н., г. Минск);
- фибра стальная анкерная ФСА Н-0П 1,0 по ТУ ВУ 690660901.001-2015 (ООО «АЛЬТЕРФибра», а/г Колодищи, РБ; код ТН ВЭД: 7326 20 000 9; сертификат №232.1/1683-1; поставщик ИП КОВАЛЕВ Н.Н., г. Минск);
- микрофибра прямая из проволоки ФСВ-М-0,20/12 по ТУ ВУ40007485 4.628-2011 (ОАО «БМЗ-управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, РБ).



Рис. 1. Фибровое волокно: а – фибра стальная анкерная; б – микрофибра стальная прямая; в – микрофибра стальная анкерная; г – фибра полипропиленовая; д – фибра базальтовая

Серия образцов состояла из трех балочек размером 70×70×280 мм. На каждый тип бетона-матрицы приходилось по три серии об-

разцов: без фибрового армирования (серия 0), первый вариант армирования (серия 1), второй вариант армирования (серия 2). Фибро-

вое армирование представляет собой смесь различных типов волокон. Соотношение количества фибры обусловлено технологическими факторами бетонной смеси: возмож-

ность перемешивания и укладки в формы, отсутствие расслоения и водоотделения. Составы бетонных смесей представлены в таблице.

Составы бетонных смесей

Номер состава	Расход компонентов, %											
	Процентное соотношение компонентов бетонной матрицы				Процент от массы цемента		Процент от массы вяжущего	Процент по объему бетонной смеси				
	Цемент	Щебень Фр. 5-10 мм	Щебень Фр. 5-20 мм	Песок	РСАМ	МКУ	Добавка модифицированная наноглеродом	Фибра базальтовая	Фибра полипропиленовая	Микрофибра стальная анкерная	Микрофибра стальная прямая	Фибра стальная анкерная
A.0	18	-	46	36	-	-	0,4	-	-	-	-	-
A.1	18	-	46	36	-	-	0,4	0,07	-	-	0,26	0,26
A.2	18	-	46	36	-	-	0,4	-	1,1	0,26	-	0,26
B.0	19	-	45	36	-	-	0,9	-	-	-	-	-
B.1	19	-	45	36	-	-	0,9	0,07	-	-	0,26	0,26
B.2	19	-	45	36	-	-	0,9	-	1,1	0,26	-	0,26
V.0	19	-	45	36	12	-	0,8	-	-	-	-	-
V.1	19	-	45	36	12	-	0,8	0,07	-	-	0,26	0,26
V.2	19	-	45	36	12	-	0,8	-	1,1	0,26	-	0,26
G.0	23	39	-	38	8	9	1,0	-	-	-	-	-
G.1	23	39	-	38	8	9	1,0	0,07	-	-	0,26	0,26
G.2	23	39	-	38	8	9	1,0	-	1,1	0,26	-	0,26

Представленные составы бетонных смесей позволяют охватить необходимый диапазон наиболее часто используемых бетонов в строительстве. После изготовления бетонные образцы хранились в камере нормального твердения. В возрасте 28 суток проводились испытания на прочность при осевом растяжении, на сжатие, на растяжение при раскалывании.

По полученным значениям разрушающих нагрузок прочность бетона рассчитывали по формулам ГОСТ 10180, соответствующим каждому типу испытания. Прочность бетона

определяли как среднеарифметическое значение прочности испытанных образцов в серии из трех образцов по двум образцам с наибольшей прочностью.

Испытание на осевое растяжение проводилось согласно [1]. Образец закрепляли в разрывной машине Controls 70-C0820/C по схеме, приведенной на рисунке 2, и нагружали до разрушения при постоянной скорости нарастания нагрузки. Контролировались место разрушения образца – рабочая зона, а также плоскость разрушения образца.

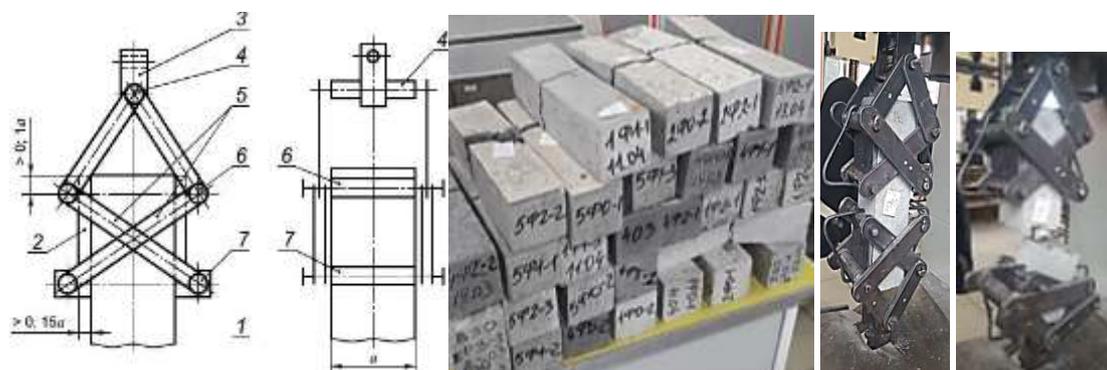


Рис. 2. Схема саморегулируемого зажима и внешний вид испытанных образцов:
1 – образец; 2 – прижимная пластина; 3 – концевой элемент шарнира Гука; 4 – ось; 5 – тяга;
6 – подвижная опора захвата (каток); 7 – неподвижная опора захвата

Результаты испытаний на осевое растяжение образцов-балочек представлены на рисунке 3.

Используемое оборудование позволяет фиксировать диаграммы разрушения «Нагрузка-Перемещение (траверсы)» (рис. 4) [4].

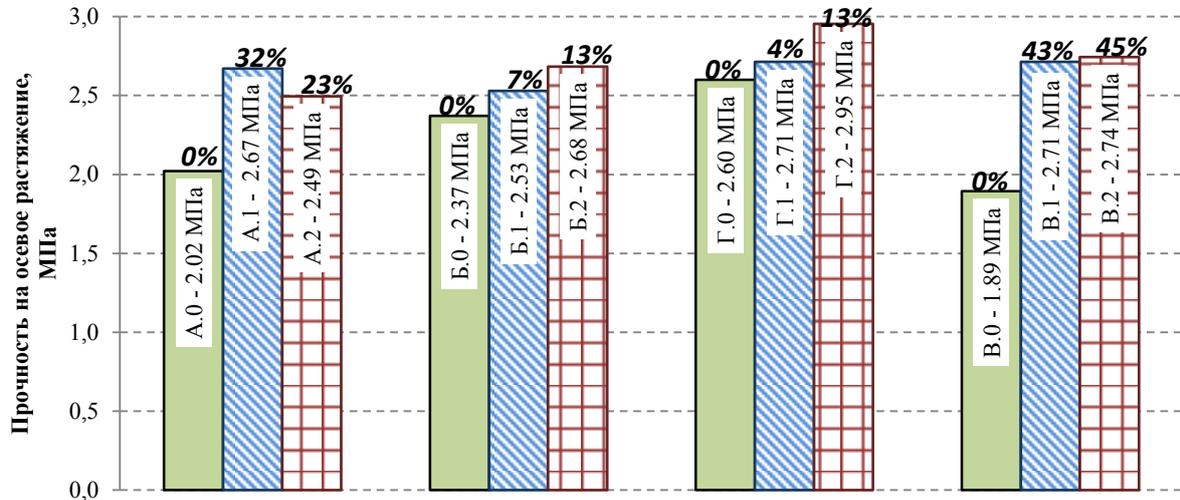


Рис. 3. Результаты испытаний на осевое растяжение образцов

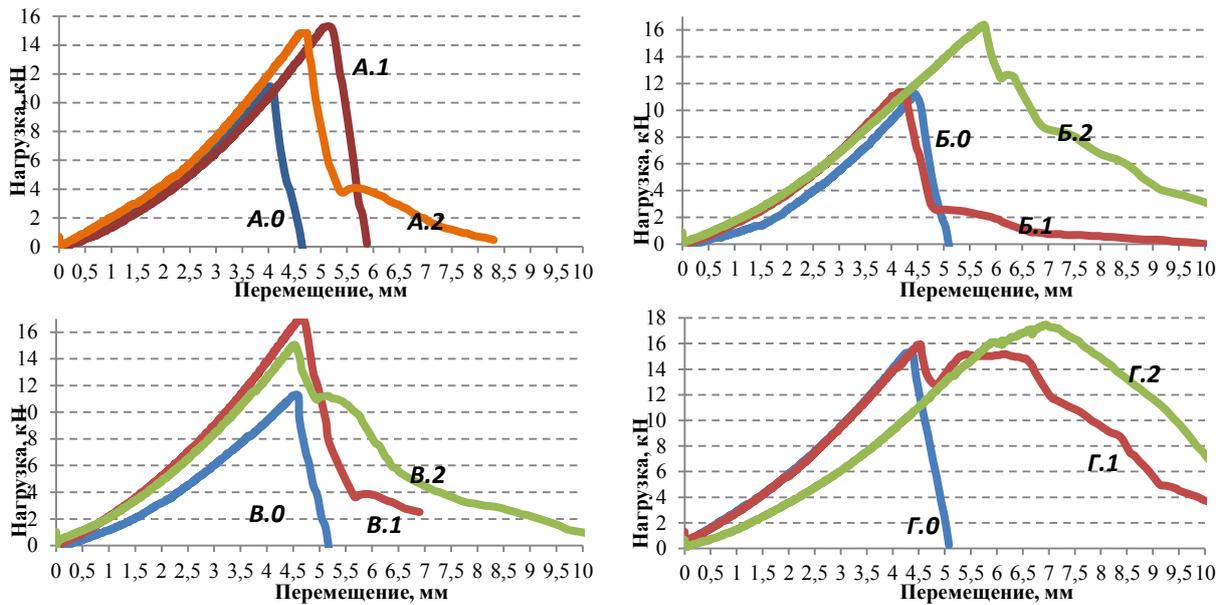


Рис. 4. Диаграммы «Нагрузка – Перемещение»



Рис. 5. Испытание половинок балочек на сжатие

После испытания на осевое растяжение образцы фрагментировались на две половинки балочки, которые пригодны для дальнейших испытаний. Так, одну половинку испытывали на сжатие, а вторую – на раскалывание. Испытания проводились на гидравличе-

ском прессе Testing 2.1005 согласно [1]. Схема испытаний и внешний вид образцов показаны на рисунках 5, 7. Результаты испытаний на сжатие половинок балочек представлены на рисунке 6, на растяжение при раскалывании – на рисунке 8 [5].

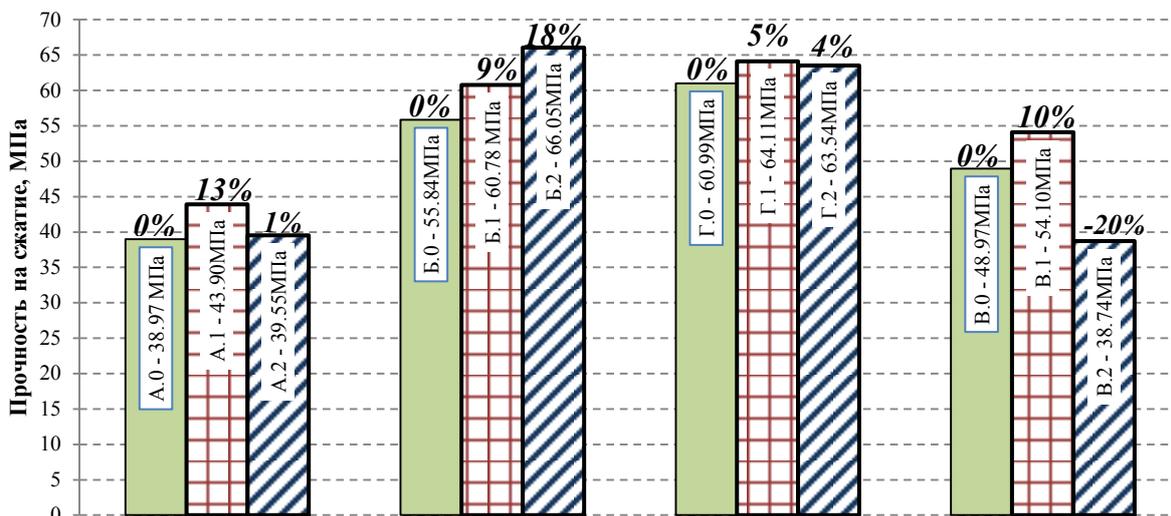


Рис. 6. Результаты испытаний прочности на сжатие половинок балочек



Рис. 7. Испытание половинок балочек на растяжение при раскалывании

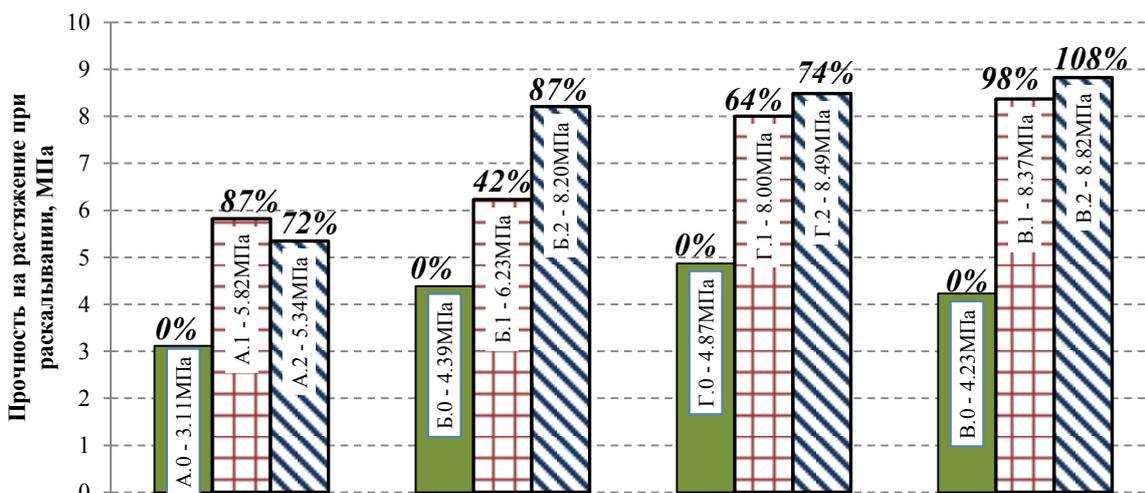


Рис. 8. Результаты испытаний прочности на растяжение при раскалывании половинок балочек

На основе анализа полученных результатов можно сделать следующие **выводы** [6-8]:

1. Наибольший эффект от комплексного фибрового армирования проявляется при определении прочности на растяжение при раскалывании. Увеличение прочности фибронаноармированного бетона по сравнению с просто наноармированным находится в диапазоне 42...108 % в зависимости от класса прочности бетона-матрицы.

2. Повышение прочности на осевое растяжение фибронаноармированного бетона находится в пределах 4...45 % в сравнении с нанобетоном без фибры. Причем наибольший прирост наблюдается в матрицах А и В – 23...45 %. В матрицах Б и Г прирост прочности составляет 4~13 %. Серии без фибры составов А и В имеют более низкую прочность на осевое растяжение, чем Б и Г. В рамках данного исследования можно сделать заключение, что наибольшая эффективность комплексного армирования достигается в бетонной матрице с относительно низкой прочностью на осевое растяжение.

3. Все значения прочности на осевое растяжение независимо от прочности исходной матрицы бетона находятся в диапазоне 2,5...3,0 МПа.

4. Получаемые при испытаниях на осевое растяжение диаграммы «Нагрузка-Перемещение» позволяют наглядно оценить

особенности разрушения образца. Характер ниспадающей ветви показывает степень вязкости разрушения фибронанобетона. В последующем эти графики можно обрабатывать для получения комплексного параметра оценки вязкости разрушения фибробетона.

5. Прирост прочности на сжатие для фибробетона не является характерной особенностью. Однако в составах А и Б прирост прочности составил 13 % и 18 % соответственно. В то же время в составе В наблюдается снижение прочности.

6. Особое внимание следует уделить внешнему виду образцов после испытаний. Так, образцы без фибры хрупко фрагментировались сразу же после потери прочности при всех видах испытаний. Образцы с фиброй сохраняли относительную целостность даже после полной потери несущей способности и изменения в процессе нагружения своей геометрии. Фибра, находящаяся в образце, не давала рассыпаться бетону, стягивая зерна крупного заполнителя, который в свою очередь защемлял мелкий заполнитель в теле образца. Это все характеризует повышение вязкости разрушения фибробетона по сравнению с обычным бетоном. Для более полной оценки этого явления необходимо исследовать представленные составы с получением коэффициента интенсивности напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 10180. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
2. ГОСТ 18105. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
3. ГОСТ 7473. Смеси бетонные. Технические условия.
4. Пухаренко Ю. В. Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Диаграммы деформирования цементных композитов, армированных стальной проволоочной фиброй // Строительные науки. Раздел Строительство и архитектура. 2018. № 2. С. 143-147.
5. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и влажностных воздействиях: монография / С. Н. Леонович [и др.]. М.: Инфра-М, 2018. 257 с.
6. Повышение прочности бетона пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Б. М. Хрусталева, Е. А. Коледа // Строительные материалы. 2018. № 6. С. 67–72.
7. Коледа Е. А., Леонович С. Н. Характеристики трещиностойкости фибробетона как определяющий фактор качества // Технология строительства и реконструкции: TCR-2015: сборник докладов Международной научно-технической конференции / Белорусский национальный технический университет и Национальная академия наук Беларуси; под ред. Б. М. Хрусталева и С. Н. Леонович. Минск: БНТУ, 2017. С. 282-287.

8. Коледа Е. А., Бондарович А. И., Леонович С. Н. Влияние дисперсного армирования на плотность и пористость фибробетона // Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов): материалы Международной научно-технической конференции (Минск, 30 мая 2017 г.) / [редколлегия: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа]. Минск: БНТУ, 2017. С. 97-102.

Информация об авторах

КОЛЕДА Елена Александровна – аспирант кафедры «Технология строительного производства», магистр технических наук, Белорусский национальный технический университет, г. Минск. Область научных интересов – трещиностойкость фибробетонов. E-mail: elena_koleda@bk.ru

ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич – иностранный академик РААСН, доктор технических наук, профессор, Белостокский технический университет, г. Белосток (Польша). Область научных интересов – технология строительного производства. E-mail: leonovichsn@tut.by

ЖДАНОК Сергей Александрович – академик НАН РБ, доктор технических наук, председатель научно-технического совета научно-производственного предприятия "Перспективные исследования и технологии", г. Минск. Область научных интересов – физика и химия неравновесных процессов и их технические приложения. E-mail: ceo@art-pte.com

UDC 624.012

E. A. Koleda¹, S. N. Leonovich², S. A. Zhdanok³

¹Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus),

²Belostok Technical University (Belostok, Poland),

³National Academy of Sciences of the Republic of Belarus (Minsk)

Abstract. Concretes are hierarchically organized multi-level structures of dispersed systems. It is believed that in concrete there are always some initial cracks (defects), from which the development of the main crack begins. Increasing the fracture toughness of concrete (its crack resistance) can be achieved not only by single-level (traditional), but also by multi-level dispersed reinforcement of its structure, considered as a means of inhibiting cracks at the corresponding structural levels of different scale: coarse-grained concrete, fine-grained concrete, cement micro-concrete, cementing substance. At the level of the cementing substance, the reinforcement of cracks is achieved by introducing carbon nanotubes, which, due to their geometric shape, can easily block nanoscale cracks. At the macro level, disperse reinforcement with high modulus fiber fiber, which is able to inhibit the process of formation of a trunk crack, acts as a reinforcing substance. The use of multi-level dispersed reinforcement of the structure in order to improve the crack resistance can create prerequisites for obtaining concrete of a new generation with their wider functionality. Concrete with multi-level dispersed reinforcement will be in demand in areas where increased crack resistance, tensile strength, high impact strength and wear resistance are needed. Dispersed multilevel reinforcement of a concrete matrix can contribute to a fundamental change in the conditions and energy of the formation of cracks in the structure of the material.

The article presents the results of tests of nanofibro-concrete samples-beams for strength under axial tension, tensile strength upon splitting, compressive strength. For the study, four compositions of concrete matrix matrices were taken. A mixture of various types of macro-and nano-level fibers was introduced into the concrete matrix. Reinforcement at the macro level was provided by the following types of fibers: steel anchor wire 50 mm and 12 mm, steel straight wire 12 mm, basalt and polypropylene. At the nanoscale, carbon nanotubes were used as reinforcing fibers. According to the obtained results, the strength of the obtained nanofibro-concrete on axial stretching increases by 4-45 %, tensile strength when splitting by 42-108 %.

Keywords: fiber-reinforced concrete; nano-fiber concrete; strength for axial tension; tensile strength during splitting; compressive strength; fiber; nanotubes; nanostructured carbon.

REFERENCES

1. GOST 10180. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obrazcam [Concretes. Methods for determining the strength of the control samples].
2. GOST 18105. Betony. Pravila kontrolya i ocenki prochnosti [Concretes. Rules for control and evaluation of strength].
3. GOST 7473. Smesi betonnye. Tekhnicheskie usloviya [Concrete mixes. Technical conditions].
4. Puharenko, Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. Diagrammy deformirovaniya cementnyh kompozitov, armirovannyh stal'noj provolochnoj fibroj [Deformation diagrams of cement composites reinforced with steel wire fiber], *Stroitel'nye nauki. Razdel Stroitel'stvo i arhitektura* [Building science. Section Construction and architecture], 2018, No. 2, pp. 143-147.
5. Leonovich S. N. [et al.] Prochnost', treshchinostjkost' i dolgovechnost' konstrukcionnogo betona pri temperaturnyh i vlazhnostnyh vozdeystviyah: monografiya [Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and humidity effects: monograph], Moscow: Infra-M, 2018, 257 p.
6. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khrustalev B. M., Koleda E. A. Povyshenie prochnosti betona plastificiruyushchej dobavkoj na osnove nanostrukturirovannogo ugljeroda [Increasing the strength of concrete with a plasticizing additive based on nanostructured carbon], *Stroitel'nye materialy* [Construction materials], 2018, No. 6, pp. 67-72.
7. Koleda E. A., Leonovich S. N. Harakteristiki treshchinostjivosti fibrobetona kak opredelyayushchij faktor kachestva [Characteristics of the crack resistance of fiber-reinforced concrete as a determining factor for quality], *Tekhnologiya stroitel'stva i rekonstrukcii: TCR-2015: sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Technology of construction and reconstruction: TCR-2015: collection of reports of the International Scientific and Technical Conference], Belarusian National Technical University and the National Academy of Sciences of Belarus; by ed. B. M. Khrustalev and S.N. Leonovich, Minsk: BNTU, 2017, pp. 282-287.
8. Koleda E. A., Bondarovich A. I., Leonovich S. N. Vliyanie dispersnogo armirovaniya na plotnost' i poristost' fibrobetona [Influence of disperse reinforcement on the density and porosity of fiber-reinforced concrete], *Innovacionnaya podgotovka inzhenernyh kadrov na osnove evropejskih standartov (Evrokodov)* [Innovative training of engineering personnel based on European standards (Eurocodes)]: materials of the International Scientific technical conference (Minsk, May 30, 2017), [editorial board: V. F. Zverev, S. M. Koleda], Minsk: BNTU, 2017, pp. 97-102.

Information about the authors

KOLEDA Elena Alexandrovna – Graduate Student of the Department "Technology of Construction Production", Master of Technical Sciences, Belarusian National Technical University, Minsk. Area of scientific interests – fiber concrete crack resistance. E-mail: elena_koleda@bk.ru

LEONOVICH Sergey Nikolaevich – Foreign Academician of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belostok Technical University, Belostok (Poland). Area of scientific interests – technology of building production. E-mail: leonovichsn@tut.by

ZhdANOK Sergey Alexandrovich – Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Chairman of the Scientific and Technical Council of the Scientific-Production Enterprise "Advanced Research and Technology", Minsk. Area of scientific interests – physics and chemistry of non-equilibrium processes and their technical applications. E-mail: ceo@art-pte.com

Библиографическая ссылка

Коледя Е. А., Леонувич С. Н., Жданок С. А. Результаты испытаний нановибробетона на растяжение с комплексным фибровым армированием // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2(6). – С. 16-23.