

Академик С. А. Жданок<sup>1</sup>, С. Н. Леонович<sup>2,3</sup>, Е. А. Садовская<sup>2</sup>, Е. А. Полонина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Передовые исследования и технологии, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Циндаоский технологический университет, Циндао, Китайская Народная Республика

## ПРОЧНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ МНОГОУРОВНЕВОМ АРМИРОВАНИИ

**Аннотация.** Подтверждена рабочая гипотеза о том, что требуемая вязкость разрушения конструкционного бетона может обеспечиваться многоуровневым армированием: на уровне кристаллического сростка цементного камня – углеродные нанотрубки, а на уровне мелкозернистого бетона – различные фибровые волокна макроразмера (стальная, полимерная). Армирование углеродными нанотрубками кристаллического сростка приводит к повышению прочности на растяжение на 20 %, повышению модуля Юнга. При дисперсном армировании модифицированного наночастицами бетона на уровне мелкозернистого бетона прочность на растяжение увеличивается на 109 %, критический коэффициент интенсивности напряжений (показатель трещиностойкости) при нормальном отрыве увеличивается на 280 %, при поперечном сдвиге – на 48 %.

**Ключевые слова:** наночастицы, бетон, вязкость разрушения, фибра, фибробетон

**Для цитирования:** Прочность и трещиностойкость цементных композитов при многоуровневом армировании / С. А. Жданок [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 4. – С. 340–344. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-4-340-344>

Siarhei A. Zhdanok<sup>1</sup>, Siarhei N. Leonovich<sup>2,3</sup>, Elena A. Sadovskaya<sup>2</sup>, Elena N. Polonina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Advanced Research and Technologies, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>Qingdao University of Technology, Qingdao, China

## STRENGTH AND CRACK RESISTANCE OF CEMENT COMPOSITES UNDER MULTILEVEL REINFORCEMENT

**Abstract.** The working hypothesis is confirmed that the required fracture toughness of structural concrete can be provided by multi-level reinforcement: at the level of the crystalline joint of cement stone – carbon nanotubes, and at the level of fine-grained concrete – various macro-sized fiber fibers (steel, polymer). Reinforcement of a crystalline splice with carbon nanotubes leads to an increase in tensile strength by 20 %, an increase in Young's modulus. With dispersed reinforcement of concrete modified with nanoparticles at the level of fine-grained concrete, the tensile strength increases by 109 %, the critical stress intensity coefficient (crack resistance index) increases by 280 % at normal separation, and by 48 % at transverse shear.

**Keywords:** nanoparticles, concrete, fracture toughness, fiber, fiber-reinforced concrete

**For citation.** Zhdanok S. A., Leonovich S. N., Sadovskaya E. A., Polonina E. N. Strength and crack resistance of cement composites under multilevel reinforcement. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 4, pp. 340–344 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-4-340-344>

**Введение.** Обеспечение требуемой вязкости разрушения (трещиностойкости) конструкционного бетона может достигаться введением ингибиторов распространения трещин: нановолокна армируют кристаллический сросток цементного камня, фибра макроуровня (стальная, полимерная, базальтовая либо их комбинация) различной концентрации армирует мелко- и крупнозернистый бетон. Бетон рассматривается как многоуровневая структура и начало зарождения трещин происходит на наноуровне в цементной матрице с последующим ростом до размера макротрещин. Дисперсные волокна, равномерно распределяясь по всему объему материала, создают пространственный каркас и способствуют торможению развивающихся трещин под действием разрушающих усилий [1; 2].

В качестве нановолокон использованы углеродные нанотрубки (УНТ), позитивное влияние которых на микроструктуру и наноструктуру модифицированного цементного камня в зависи-

мости от типа углеродного материала, его физических и химических характеристик, геометрических параметров волокон и равномерности диспергирования в теле композита подтверждено в [1–8]. Присутствие углеродных нановолокон изменяет микроструктуру и наноструктуру бетона. Зафиксировано уменьшение капиллярной и общей пористости с последующим улучшением структуры пор [3–5]. Результатом процессов, происходящих в капиллярах и трещинах, являются деформации в межзерновой матрице, свободному течению которых препятствуют жесткие зерна клинкера и углеродные нанотрубки, что создает в вершинах разделительных трещин некоторую интенсивность напряжения. Интенсивность напряжений, а также напряженно-деформированное состояние вблизи вершин капилляров и трещин определяются критерием трещиностойкости ( $K_c$ ) и коэффициентами интенсивности напряжений ( $K_{IC}$ ,  $K_{IIC}$ ) [9–12].

**Материалы и методы исследования.** В качестве основных компонентов для исследования модифицированного наночастицами цементного камня использовались: вяжущее – портландцемент ПЦ 500 Д0; модифицирующее вещество – многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) производства ООО «Передовые исследования и технологии» по ТУ ВУ 690654933.001–2011: средний диаметр трубок 10–15 нм, средняя длина – 1–5 мкм, 10–20 стенок; суперпластификатор (СП) в виде водного раствора – поликарбоксилатный сополимер, содержание нелетучих веществ 39–41 %; вода для затворения и последующего твердения. Исследуемые цементные составы содержали 0,4 % от массы цемента добавки, причем в серии образцов № 1 не было никаких добавок, в серии № 2 – только водный раствор СП, в серии № 3 – водный раствор СП с углеродными нанотрубками (0,00004 % от массы цемента) [13].

Исследования механических свойств цементных материалов (многофазных материалов) на наноразмерном уровне выполнены методом наноиндентирования, и зафиксирован его модуль упругости – показатель упругого деформирования материала (рис. 1, *a*).

Полученные результаты показывают, что гистограммы распределения объема по приведенному модулю упругости ( $M$ ) в образцах состава № 3 сдвинулись в область больших средних значений по сравнению с образцом состава № 2 (рис. 1, *a*). При этом уменьшилась объемная доля фазы 1 с меньшими средними значениями  $M$  и возросла объемная доля фаз 2 и 3 с большими

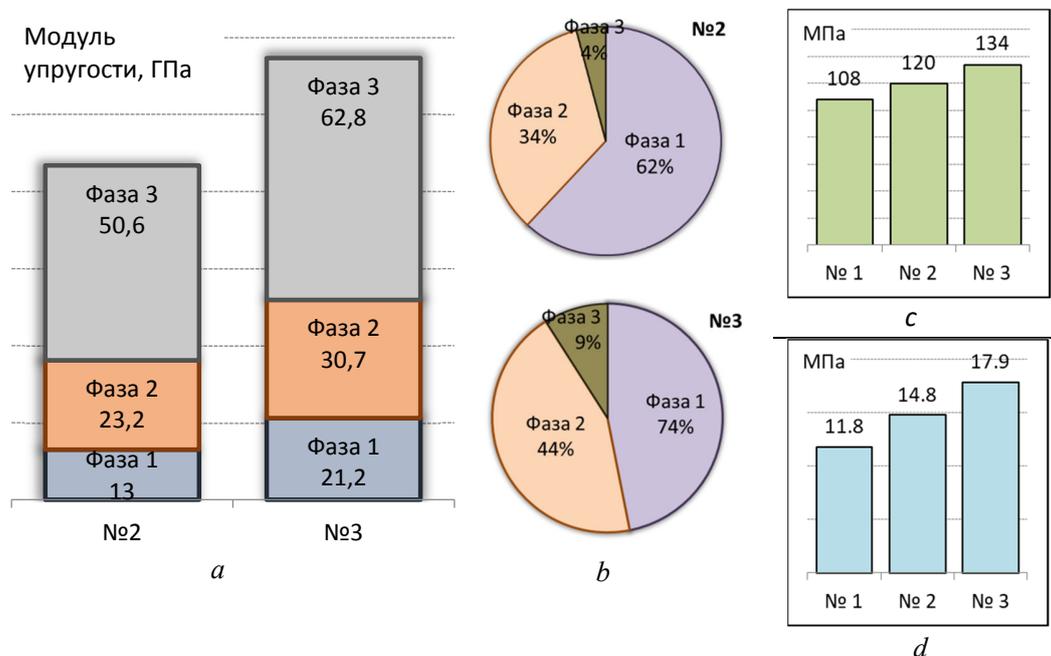


Рис. 1. Результаты испытаний модифицированного наночастицами цементного камня: *a* – значения модуля упругости по трем фазам; *b* – объемные доли фаз; *c* – прочность на сжатие; *d* – прочность на растяжение при изгибе

Fig. 1. Test results of tests of cement stone modified with nanoparticles: *a* – the values of the modulus of elasticity in three phases; *b* – volume fractions of phases; *c* – compressive strength; *d* – tensile strength in bending

средними значениями  $M$  и  $c$  более плотной объемной упаковкой частиц геля С–S–Н. Полученные данные свидетельствуют об изменении структуры С–S–Н геля в образцах, модифицированных наночастицами УНТ.

Подтверждено позитивное влияние углеродных нанотрубок: прирост прочности на сжатие матрицы составил 12 % относительно состава с пластификатором без УНТ и прочности на растяжение при изгибе на 20 % (рис. 1, с).

Для исследования тяжелого модифицированного наночастицами фибробетона на прочность и вязкость разрушения в качестве дисперсного армирования в цементно-песчаную матрицу с УНТ вводилась фибра стальная проволочная с анкерами на концах ( $\mu_v = 1\%$ ) (таблица).

#### Рецептуры фибробетонных составов, модифицированных наночастицами Recipes of fiber-reinforced concrete compositions modified with nanoparticles

Номер состава	Состав сырьевой смеси				Состав добавки		Фибра	Марка по удобоукладываемости
	Цемент	Щебень Фр.5-20 мм	Песок	Наномодифицированная добавка (% от массы вяжущего)	Массовая доля СП (по сух. вещ-ву) к цементу, %	Массовая доля тв. наноглерода к цементу, %		
Ф0	400	1020	820	0,8	0,32	0,0006	–	П5
Ф2	400	1020	820	0,8	0,32	0,0006	80	П3

Введение стальной фибры в наномодифицированную матрицу оказывает существенное влияние на прочность при растяжении (на растяжение при изгибе 109 %, на осевое растяжение 25 %, на растяжение при раскалывании от 43 до 63 %) (рис. 2).

Результаты испытаний на вязкость разрушения показывают увеличение на 280 и 109 % значения коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве, увеличение на 48 % значения коэффициента интенсивности напряжений при поперечном сдвиге (рис. 3).

**Заключение.** Многоуровневое армирование оказывает положительное влияние на прочность и трещиностойкость бетонов. Об этом свидетельствует увеличение показателей прочности на растяжение и вязкости разрушения  $K_{IC}$  и  $K_{IIC}$ . Модифицированные наночастицами фибробетоны с многоуровневым дисперсным армированием являются перспективными материалами для использования в конструкциях с повышенными требованиями по трещиностойкости, морозо-

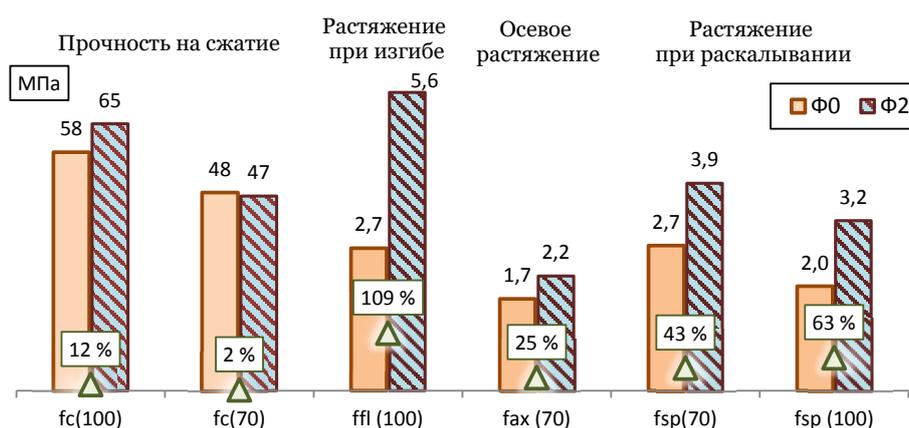


Рис. 2. Результаты испытаний модифицированного наночастицами фибробетона на прочность (приведенные значения):  $fc(100)$  – осевое сжатие по кубам  $100 \times 100 \times 100$  мм;  $fc(100)$  – осевое сжатие по кубам  $70 \times 70 \times 70$  мм;  $ffl(100)$  – растяжение при изгибе призм сечением  $100 \times 100$  мм;  $fax$  – осевое растяжение призм сечением  $70 \times 70$  мм;  $fsp(70)$  – растяжение при раскалывании, сечение  $70 \times 70$  мм;  $fsp(70)$  – растяжение при раскалывании, сечение  $100 \times 100$  мм

Fig. 2. The results of strength tests of fiber-reinforced concrete modified with nanoparticles:  $fc(100)$  – axial compression in cubes  $100 \times 100 \times 100$  mm;  $fc(100)$  – axial compression in cubes  $70 \times 70 \times 70$  mm;  $ffl(100)$  – stretching during bending of prisms with a section of  $100 \times 100$  mm;  $fax$  – axial tension of prisms with a section of  $70 \times 70$  mm;  $fsp(70)$  – tension during splitting, section  $70 \times 70$  mm;  $fsp(70)$  – tension during splitting, section  $100 \times 100$  mm

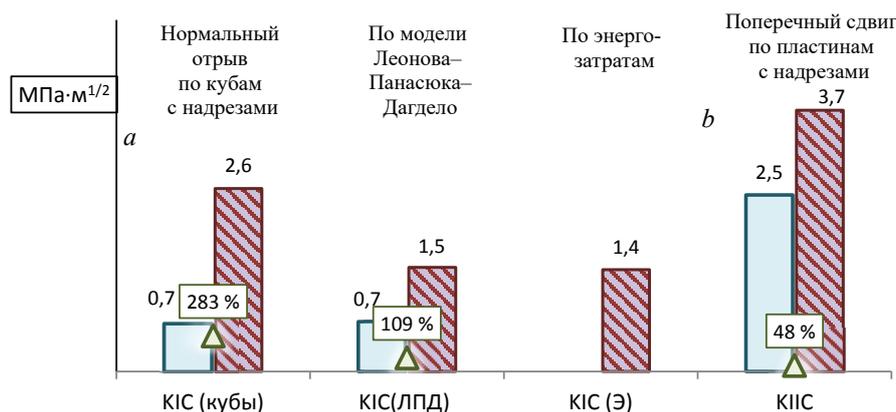


Рис. 3. Коэффициенты интенсивности напряжений:  $a - K_{IC}$  и  $b - K_{IIC}$  модифицированного наночастицами фибробетона:  $K_{IC}$  (кубы) – при нормальном отрыве при внецентренном сжатии кубов с боковыми надрезами;  $K_{IC}$  (ЛПД) – при расчете по формуле Леонова–Панасюка–Дагдейло;  $K_{IC}$  (Э) – по энергозатратам полученных из полной диаграммы деформирования образцов-призм на изгиб;  $K_{IIC}$  – при поперечном сдвиге образцов-пластин при центральном сжатии

Fig. 3. Stress intensity factors:  $a - K_{IC}$  and  $b - K_{IIC}$  of nanoparticle-modified fiber-reinforced concrete:  $K_{IC}$  (cubes) – at normal separation with eccentric compression of cubes with side cuts;  $K_{IC}$  (LPD) – when calculated according to the Leonov–Panasjuk–Dagdeilo formula;  $K_{IC}$  (E) – according to the energy consumption obtained from the complete diagram of the deformation of specimens-prisms for bending;  $K_{IIC}$  – with transverse shear of specimens-plates under central compression

стойкости, водонепроницаемости, а в комплексе – долговечности. Это позволит перейти к производственному выпуску наномодифицированного фибробетона для объектов промышленного, жилищно-коммунального и дорожного строительства.

### Список использованных источников

1. Механизм повышения прочности цементного материала, модифицированного наночастицами  $\text{SiO}_2$  и МУНТ / Е. Н. Полонина [и др.] // Инженерно-физ. журн. – 2021. – Т. 94, № 1. – С. 72–83.
2. Садовская, Е. А. Многоуровневая структура бетона: анализ и классификация уровней организации структуры конгломератных строительных композитов / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Проблемы современного строительства. – Минск, 2019. – С. 285–297.
3. Физико-механические характеристики бетона, модифицированного пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода / С. А. Жданок [и др.] // Инженерно-физ. журн. – 2019. – Т. 92, № 1. – С. 14–20.
4. Влияние пластифицирующей добавки, содержащей углеродный наноматериал на свойства самоуплотняющегося бетона / С. А. Жданок [и др.] // Вестн. гражданских инженеров. – 2018. – № 6 (71). – С. 76–85. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-6-76-85>
5. Повышение прочности бетона пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода / С. А. Жданок [и др.] // Строительные материалы. – 2018. – № 6. – С. 67–72. <https://doi.org/10.31659/0585-430x-2018-760-6-67-72>
6. Материалы на основе цемента, модифицированные наноразмерными добавками / Е. Н. Полонина [и др.] // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 3. – С. 189–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194>
7. Жданок, С. А. Влияние полимерных суперпластификаторов на различные виды углеродных наноматериалов / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Инженерно-физ. журн. – 2022. – Т. 95, № 1. – С. 165–168.
8. Influence of the nanostructured-carbon-based plasticizing admixture in a self-compacting concrete mix on its technological properties / S. A. Zhdanok [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92, N 2. – P. 376–382. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01941-7>
9. Садовская, Е. А. Расчет коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве по прочности на растяжение при изгибе / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2022. – № 8. – С. 27–31. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2022-31-8-27-31>
10. Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге для нанофибробетона / Е. А. Садовская [и др.] // Строительные материалы. – 2021. – № 9. – С. 41–46. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46>
11. Вязкость разрушения цементных материалов, модифицированных углеродными нанотрубками / С. А. Жданок [и др.] // Вестник БрГТУ. – 2021. – № 3(126). – С. 48–53. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53>
12. Вязкость разрушения нанофибробетона при нормальном отрыве и поперечном сдвиге / Е. А. Садовская [и др.] // Инженерно-физ. журн. – 2022. – Т. 95, № 4. – С. 961–968.
13. Жданок, С. А. Синергетическое влияние наночастиц  $\text{SiO}_2$  и углеродных нанотрубок на свойства бетона / С. А. Жданок, С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 1. – С. 109–112. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-109-112>

## References

1. Polonina E. N., Potapov V. V., Zhdanok S. A., Leonovich S. N. Mechanism for improving the strength of a cement material modified by SiO<sub>2</sub> nanoparticles and multiwall carbon nanotubes. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, no. 1, pp. 67–78. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02274-0>
2. Sadovskaya E. A., Polonina E. N., Leonovich S. N. Multi-level structure of concrete: analysis and classification of levels of organization of the structure of conglomerate building composites. *Problemy sovremennogo stroitel'stva* [Problems of modern construction]. Minsk, 2019, pp. 285–297 (in Russian).
3. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A., Leonovich S. N. Physicomechanical characteristics of concrete modified by a nanostructured-carbon-based plasticizing admixture. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 1, pp. 12–18. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01902-0>
4. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. The influence of the plasticizing additive containing carbon nanomaterial on the properties of self-compacting concrete. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2018, no. 6(71), pp. 76–85 (in Russian). <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-6-76-85>
5. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. Strength enhancement of concrete with a plasticizer on the basis of nano-structured carbon. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2018, no. 6, pp. 67–72 (in Russian). <https://doi.org/10.31659/0585-430x-2018-760-6-67-72>
6. Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Sadovskaya E. A., Budrevich N. A. Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives. *Science & Technique*, 2021, vol. 20, no. 3, pp. 189–194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194>
7. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N. Influence of polymer superplasticizers on various types of carbon nanomaterials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, vol. 95, no. 1, pp. 163–167. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02464-4>
8. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khroustalev B. M., Koleda E. A. Influence of the nanostructured-carbon-based plasticizing admixture in a self-compacting concrete mix on its technological properties. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 2, pp. 376–382. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01941-7>
9. Sadovskaya E. A., Leonovich S. N. Relationship of the stress-intensity coefficient at normal separation and the strength in tension. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Science], 2022, no. 8, pp. 27–31 (in Russian). <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2022-31-8-27-31>
10. Sadovskaya E. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Potapov V. V. Critical stress intensity coefficient at transverse shear for nanofibrobeton. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2021, no. 9, pp. 41–46 (in Russian). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46>
11. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Sadovskaya E. A., Leonovich S. N. Fracture toughness of carbon nanotubes modified cement based materials. *Vestnik of Brest State Technical University*, 2021, no. 3(126), pp. 48–53 (in Russian). <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53>
12. Sadovskaya E. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Potapov V. V. Fracture toughness of nanofiber-reinforced concrete on normal separation and in-plane shear. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, vol. 95, no. 4, pp. 945–952. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02551-6>
13. Zhdanok S. A., Leonovich S. N., Polonina E. N. Synergistic influence of SiO<sub>2</sub> nanoparticles and carbon nanotubes on the properties of concrete. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 1, pp. 109–112 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-109-112>

## Информация об авторах

*Жданок Сергей Александрович* – академик, д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Передовые исследования и технологии (ул. Совхозная, д. 1-16, 223058, Лесковка, Минский р-н, Республика Беларусь). E-mail: ceo@art-pte.com.

*Леонovich Сергей Николаевич* – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sleonovich@mail.ru.

*Садовская Елена Александровна* – заведующий кафедрой. Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: elena\_koleda@bk.ru.

*Полонина Елена Николаевна* – ст. преподаватель. Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: grushevskay\_en@tut.by.

## Information about the authors

*Zhdanok Siarhei A.* – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher. Advanced Research and Technologies (Sovkhoznaya Str., 1-16, 223058, Leskovka village, Minsk district, Republic of Belarus). E-mail: ceo@art-pte.com.

*Leonovich Siarhei N.* – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sleonovich@mail.ru.

*Sadovskaya Elena A.* – Head of the Department. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: elena\_koleda@bk.ru.

*Polonina Elena N.* – Senior Lecturer. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grushevskay\_en@tut.by.