

ISSN 1561-8323 (Print)  
ISSN 2524-2431 (Online)

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**TECHNICAL SCIENCES**

УДК 666.972  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-109-112>

Поступило в редакцию 02.11.2021  
Received 02.11.2021

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

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

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

**СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ SiO<sub>2</sub>  
И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА СВОЙСТВА БЕТОНА**

**Аннотация.** Продемонстрирован взаимоусиливающий эффект влияния сверхмалых доз наночастиц SiO<sub>2</sub> и многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в пределах 0,00004–0,000006 мас. % от массы цемента на структуру цементного камня и механические свойства бетона. Обнаружена корреляция увеличения механической прочности бетона на 56 % с изменениями в структуре цементного камня, при которых существенно возрастает доля кристаллов гидроалюмината кальция, гидросульфалюмината кальция и тоберморита типа 14А. Полученные результаты закладывают основы для разработки технологии промышленного производства комплексных добавок в бетоны с комбинацией наночастиц (МУНТ + SiO<sub>2</sub>), позволяющих улучшить механические и физические характеристики бетона и увеличить его долговечность.

**Ключевые слова:** комплексная добавка, наночастицы, бетон, прочность

**Для цитирования.** Жданок, С. А. Синергетическое влияние наночастиц SiO<sub>2</sub> 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>

**Academician Siarhei A. Zhdanok<sup>1</sup>, Sergey N. Leonovich<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*

**SYNERGISTIC INFLUENCE OF SiO<sub>2</sub> NANOPARTICLES  
AND CARBON NANOTUBES ON THE PROPERTIES OF CONCRETE**

**Abstract.** The mutually reinforcing effect of the influence of ultra-low doses of SiO<sub>2</sub> nanoparticles and multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) in the range of 0.00004–0.000006 wt. % of the mass of cement on the structure and mechanical properties of concrete was demonstrated. A correlation was found between an increase in the mechanical strength of concrete by 56 % with changes in the structure of the cement stone, at which the proportion of crystals of calcium hydroaluminate, calcium hydrosulfoaluminate and type 14A tobermorite increases significantly. The results obtained lay the foundations for the development of a technology for the industrial production of complex additives in concrete with a combination of nanoparticles (MWCNT + SiO<sub>2</sub>), which make it possible to improve the mechanical and physical characteristics of concrete and increase its durability.

**Keywords:** complex additive, nanoparticles, concrete, strength

**For citation.** 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>

**Введение.** Существенное влияние на прогресс в исследовании свойств бетонов в течение последних 20 лет оказала возможность управляемого и контролируемого воздействия на структуру геля гидросиликатов кальция (CSH-геля), заполняющего до 70 % и более объема цементного

бетона, состоящего в введении в его состав наночастиц (НЧ) разного химического состава с высокой удельной поверхностью (до  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и высокой физико-химической активностью.

Наиболее интересными НЧ, вводимыми в состав бетонов вместе с водой затворения, являются нанокремнезем (НК) и МУНТ. Разработка технологий массового производства этих материалов и их ценовая доступность на рынке стимулировали прикладные исследования в области их практического применения для нужд строительной индустрии [1; 2].

**Материалы и методы исследования.** При проведении исследований влияния НЧ на свойства бетона применялись следующие компоненты: в качестве вяжущего – портландцемент ПЦ 500 Д0, мелкого заполнителя – природный песок, крупного заполнителя – щебень гранитный фракцией 5–20 мм; модифицирующие вещества – золь гидротермального нанокремнезема (NS) производства РФ (ТУ 2111-001-97849280–2014) и углеродный наноструктурированный материал (NC) МУНТ, производимый отечественной компанией «Передовые исследования и технологии» (ТУ ВУ 691460594.002–2016) [3]; а также суперпластификатор (СП) на основе поликарбоксилатного сополимера (SP) и вода затворения.

ПЭМ изображения используемых в экспериментах гидротермальных наночастиц  $\text{SiO}_2$  и МУНТ представлены на рис. 1.

Составы исследованных образцов бетона и цементного камня представлены в табл. 1 и 2.

Комплексная добавка, применяемая во всех экспериментах, готовилась следующим образом: в приготовленную водную дисперсию наночастиц МУНТ добавляли отмеренное количество золя гидротермального нанокремнезема и перемешивали в смесителе, снабженном высокооборотистой мешалкой, в течение 40 мин. Таким образом, наночастицы МУНТ и  $\text{SiO}_2$  равномерно

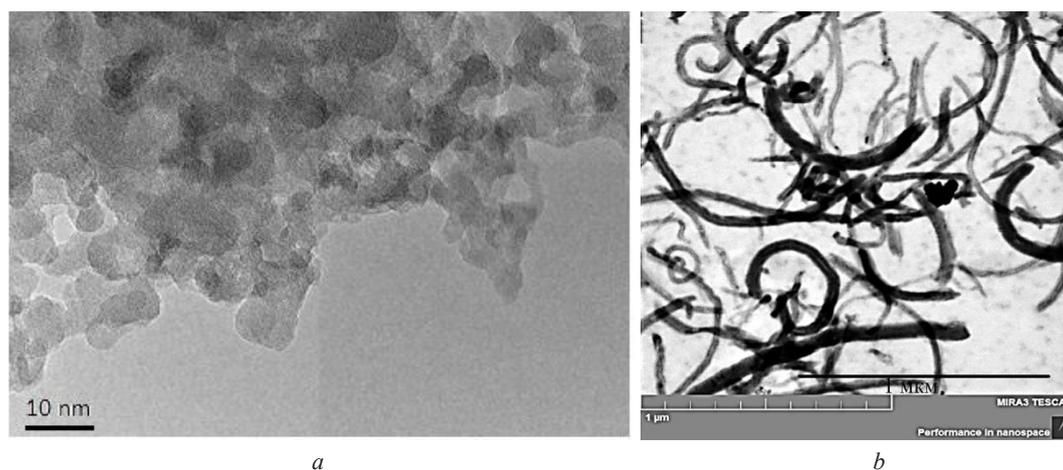


Рис. 1. ПЭМ-изображение: *a* – наночастиц  $\text{SiO}_2$ , полученное с помощью растрового электронного микроскопа Helios Nanolab 600I (FEI, США); *b* – частиц углеродного наноматериала в составе водной дисперсии

Fig. 1. SEM image: *a* –  $\text{SiO}_2$  nanoparticles obtained using the scanning electron microscope Helios Nanolab 600I (FEI, USA), *b* – carbon nanomaterial (VHM) particles as part of an aqueous dispersion

Т а б л и ц а 1. Состав исследованных бетонов

T a b l e 1. Composition of the studied concretes

Состав Compound	Состав сырьевой смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$ The composition of the raw mix, $\text{kg}/\text{m}^3$			Вода/цемент Water/Cement	Массовая доля суперпластификатора к цементу, % Mass fraction of superplasticizer to cement, %	Массовая доля тв. углерода к цементу, % Mass fraction of solid carbon to cement, %	Массовая доля тв. $\text{SiO}_2$ к цементу, % Mass fraction of solid $\text{SiO}_2$ to cement, %
	Цемент Cement	Песок Sand	Щебень фр. 10–20 Crushed stone of fraction 10–20				
C1-RS	350	975	1040	0,4	–	–	–
C1-SP				0,26	0,4	–	–
C1-NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>				0,2	0,4	–	0,000006
C1-NC <sub>50</sub> SP <sub>50</sub>				0,26	0,4	0,00004	–
C1-NC <sub>50</sub> NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>				0,24	0,4	0,00004	0,000006

Т а б л и ц а 2. Состав исследованных образцов цементного камня

Table 2. Composition of the studied cement stone samples

Состав Compound	Состав сырьевой смеси, кг/м <sup>3</sup> The composition of the raw mix, kg/m <sup>3</sup>	Вода/цемент Water/Cement	Массовая доля суперпластификатора к цементу, % Mass fraction of superplasticizer to cement, %	Массовая доля тв. углерода к цементу, % Mass fraction of solid carbon to cement, %	Массовая доля тв. SiO <sub>2</sub> к цементу, % Mass fraction of solid SiO <sub>2</sub> to cement, %
	Цемент Cement				
CM	1720	0,26	–	–	–
CM-SP <sub>50</sub>	1880	0,21	0,4	–	–
CM-NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>		0,21	0,4	–	0,000006
CM-NC <sub>50</sub> SP <sub>50</sub>		0,21	0,4	0,00004	–
CM-NC <sub>50</sub> NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>		0,21	0,4	0,00004	0,000006

распределялись в объеме дисперсии, а добавление в дисперсию небольшого количества СП придавало им седиментационную устойчивость.

**Влияние наночастиц на свойства конструкционного бетона.** Влияние комплексной добавки (C1-NC<sub>50</sub>NS<sub>8</sub>SP<sub>50</sub>) на бетонные смеси с осадкой конуса ОК = 1–4 см оценивалось путем измерения прочности бетона (рис. 2). Выявлено, что использование поликарбоксилатного суперпластификатора (C1-SP) приводит к повышению прочности на сжатие на 10 %, а при совместном использовании СП с гидротермальным нанокремнеземом (C1-NS<sub>8</sub>SP<sub>50</sub>) или с наночастицами МУНТ (C1-NC<sub>50</sub>SP<sub>50</sub>) повышению прочностных показателей, по отношению к бездобавочному бетону (C1-RS) на 28-е сутки составляет до 25 %. При использовании совместно всех компонентов добавки в проектном возрасте прочность возросла до 77 % по сравнению с бездобавочным составом.

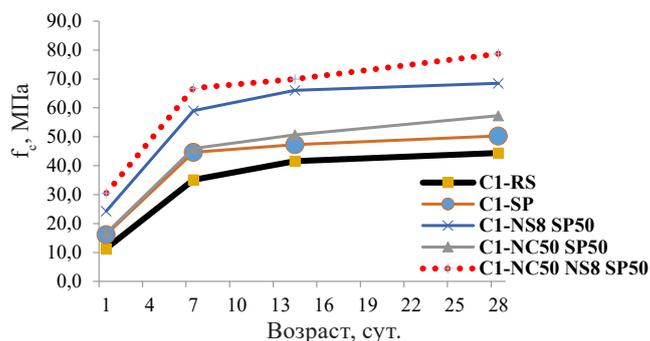


Рис. 2. Влияние комплексной добавки на прочность конструкционного бетона

Fig. 2. Influence of the complex additive on the strength of structural concrete

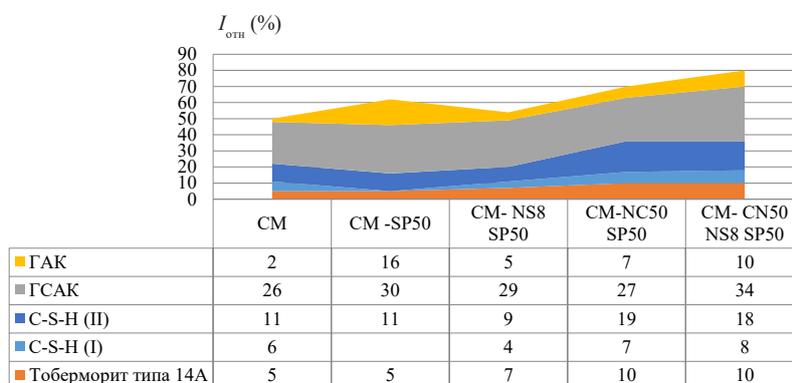


Рис. 3. Влияние различных добавок на относительную интенсивность дифракционных пиков для фаз ГАК (гидроалюминат кальция), ГСАК (гидросульфалюминат кальция), тоберморит типа 14А, C-S-H(II) и CSH(I) в возрасте 28 суток

Fig. 3. Influence of different additives on the relative intensity of diffraction peaks for the phases of calcium hydroaluminat, calcium hydrosulfoaluminat, type 14A tobermorite, C-S-H(II) and CSH(I) at an age of 28 days

**Влияние наночастиц на свойства цементного камня.** Как показали результаты исследования структуры цементного камня методом РФА, комплексная добавка способствует повышению доли низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(I) и томберморитподобных структур с пониженными значениями отношения Ca/Si в составе фаз CSH-геля, а также повышению упорядоченности структуры наночастиц и фаз CSH-геля (рис. 3).

Повышение интенсивности пиков фаз с низким отношением Ca/Si и увеличение базельных расстояний согласуется с результатами ИК-спектроскопии [4], показавшими более высокую среднюю степень полимеризации кремнекислородных тетраэдров в образцах, модифицированных наночастицами, и, соответственно, более высокую упорядоченность структуры CSH-геля на разных стадиях созревания бетона.

**Заключение.** Продемонстрированное в настоящей работе синергетическое влияние частиц нанокремнезема и углеродных нанотрубок на структуру и механические свойства бетона является основой для разработки эффективных технологий модификации существующих и конструирования новых строительных материалов, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами. Обнаруженный эффект влияния чрезвычайно малых доз, добавляемых в бетон наноразмерных частиц МУНТ и SiO<sub>2</sub>, в 1000–10000 раз меньших по сравнению с дозами традиционно вводимых добавок в строительные материалы, позволяет управлять выбором и ростом тех кристаллических структур в процессе гидратации цементных растворов, которые определяют физические и химические свойства бетонов и их долговечность

**Благодарности.** Авторы выражают глубокую благодарность профессору В. В. Потапову за поддержку.

**Acknowledgments.** Authors thanks to professor V. V. Potapov for assistance.

#### Список использованных источников

1. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites / K. Sobolev [et al.] // Proceedings of ASI Session on «Nanotechnology Concrete: Recent Developments and Future Perspectives», 2006. – Vol. 7. – P. 117–120.
2. Sanchez, F. Nanotechnology in concrete – A review / F. Sanchez, K. Sobolev // Construction and Building Materials. – 2010. – Vol. 24, N 11. – P. 2060–2071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>
3. Модификация цементных бетонов добавками, содержащими наноразмерные материалы / С. А. Жданок [и др.] // Инженерно-физ. журн. – 2020. – Т. 93, № 3. – С. 669–673.
4. Жданок, С. А. Исследование методом ИК-спектроскопии степени активации углеродных наноматериалов для модифицирования конструкционного бетона / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Строительные материалы. – 2020. – № 7. – С. 49–53. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-49-53>

#### References

1. Sobolev K., Flores I., Hermosillo R., Torres-Martinez L. M. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites. *Proceedings of ASI Session on “Nanotechnology Concrete: Recent Developments and Future Perspectives”*, 2006, vol. 7, pp. 117–120.
2. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, no. 11, pp. 2060–2071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>
3. Zhdanok S. A., Potapov V. V., Polonina E. N., Leonovich S. N. Modification of cement concrete by admixtures containing nanosized materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2020, vol. 93, no. 3, pp. 648–652. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02163-y>
4. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N. IR-spectroscopy study of the degree of activation of carbon nanomaterials for modifying structural concrete. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*, 2020, no. 7, pp. 49–53 (in Russian). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-49-53>

#### 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.

*Леонович Сергей Николаевич* – д-р техн. наук, профессор, декан. Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sleonovich@mail.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 (1-16, Sovkhoznyaya Str., 223058, Leskovka village, Minsk district, Republic of Belarus). E-mail: ceo@art-pte.com.

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

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