

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА СРЕДНЕЙ ПРОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО УГЛЕРОДНОЙ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ДОБАВКОЙ

*Е. А. Коледа¹, С. Н. Леонович², С. А. Жданок³,
Е. Н. Полонина¹, Н. А. Будревич¹*

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

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

³Национальная академия наук Республики Беларусь (г. Минск)

Аннотация. Основной проблемой современного строительного материаловедения является получение высококачественных бетонов. Решение этой проблемы может быть осуществлено в первую очередь за счет модифицирования структуры цементного камня, обеспечения в большей степени использования заложенного потенциала прочности кристаллогидратов, повышения качества совместной работы всех компонентов бетона. Одним из перспективных направлений исследований в области улучшения качества бетонов является применение в их производстве нанотехнологий. Согласно различным исследованиям, углеродные нанотрубки выделяют как наиболее перспективный вид модификатора, позволяющий создавать материалы со значительно улучшенными свойствами. На основе современных принципов модифицирования структуры производятся строительные композиционные материалы с повышенными характеристиками прочности и долговечности. Снижение водоцементного отношения при введении супер- и гиперпластификаторов, использование ультрадисперсных, наноструктурирующих и комплексных добавок позволяют в первую очередь уплотнить структуру цементного камня и, как следствие, структуру композита в целом.

В данной статье представлены результаты исследования физико-механических свойств бетона средней прочности на сжатие, приготовленного с пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода: прочности на сжатие, прочности на осевое растяжение, прочности на растяжение при изгибе, прочности на растяжение при раскалывании, а также таких показателей, как долговечность, как морозостойкость и водонепроницаемость. Оценено влияние углеродной наноструктурированной добавки на технологические свойства бетонной смеси: подвижность бетонной смеси, воздухоовлечение бетонной смеси, плотность, расслаиваемость. Установлен оптимальный расход пластифицирующей добавки, модифицированной наночастицами углерода. Выявлен прирост прочности на сжатие в сравнении с добавкой-аналогом на 13 % при одинаковом расходе компонентов. В результате проведенных испытаний установлены оптимальная дозировка углеродной наноструктурированной добавки и ее влияние на свойства бетонных смесей и оценены физико-механические свойства получаемого бетона. Для их определения применялись стандартные методы испытания, изложенные в соответствующих нормативных документах.

Ключевые слова: бетон; нанобетон; нанотрубки; наноструктурированный углерод; пластификатор; прочность бетона; морозостойкость бетона; водонепроницаемость бетона; прочность на растяжение бетона.

Введение. Современное строительство невозможно без использования бетонных смесей, приготовленных с добавлением пластифицирующих добавок. Эффективность их применения доказана временем и опытом. Одно из перспективных направлений – совершенствование пластифицирующих добавок модифицированием их наночастицами.

В качестве наночастиц используют углеродные нанотрубки, фуллерены разных модификаций и другие упорядоченные однослойные и многослойные углеродные материалы. Эффективность введения углеродных наноматериалов (УНМ) в цементные композиции в целом основывается на использовании высокого уровня энергии поверхностных частиц УНМ,

которые могут служить центрами кристаллизации, ускоряя процесс образования кристаллогидратов и обеспечивая повышение набора прочности цементного камня [1-2].

С целью исследования влияния углеродной наноструктурированной добавки на физико-механические свойства конструкционного бетона проведены испытания в строительной лаборатории Представительства АО ИК «АСЭ» в Республике Беларусь. В результате проведенных испытаний установлены оптимальная дозировка углеродной наноструктурированной добавки и ее влияние на свойства бетонных смесей и оценены физико-механические свойства получаемого бетона. Для их определения применялись стандартные методы испытания, изложенные в соответствующих нормативных документах.

Материалы. В исследованиях использовались:

- вяжущее вещество – портландцемент марки 500-Д20 по ГОСТ 10178 (ОАО «Красносельскстройматериалы» филиала №1 «Цементный завод») активностью 32,2 МПа, нормальной густоты 26,25 %;
- 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 (РУП «Гранит» г. Микашевичи) фракции 5-20 мм;
- вода для затворения и последующего твердения бетона, соответствующая требованиям СТБ 1114 и ГОСТ 23732;
- исследуемая 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);
- пластифицирующая добавка в бетон, используемая как аналог для сравнения с исследуемой добавкой, по ТУ ВУ 192047188.001-2015 (поставщик ООО «Эс Ай Кей Эй Бел», г. Минск).

Методика испытаний. Для испытаний изготавливались бетонные образцы в соответствии с требованиями [1-3]. Для испытаний прочности на сжатие формовались образцы-кубики размером 100×100×100 мм с вариацией количества исследуемой добавки и с добавкой-аналогом (вид добавки и ее количество приняты согласно действующим на предприятии картам составов бетонных смесей). Из лучшей рецептуры смеси для дальнейших испытаний изготавливались образцы-балочки 70×70×280 мм, образцы-призмы 100×100×400 мм, образцы-цилиндры 150×150 мм. Составы бетонных смесей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Составы бетонных смесей

Номер состава	Расход компонентов, %				
	Процентное соотношение компонентов бетонной матрицы			Процент от массы вяжущего	
	Цемент	Щебень, фр. 5-20 мм	Песок	Добавка, модифицированная наноглеродом	Добавка-аналог
1	17	42	33	0,3	-
2	17	42	33	0,4	-
3	17	42	33	0,6	-
4	17	42	33	-	0,6

Результаты испытаний. С целью установления оптимального количества исследуемой добавки выполняли лабораторные замесы со следующей вариацией: 0,3 %; 0,4 %; 0,6 % от массы цемента. Состав-аналог бетонной смеси изготавливали согласно действующей на производстве карте подбора – 0,6 % добавки-аналога от массы цемента. Оптимальное количество исследуемой добавки на основе наноструктурированных материалов определяли по двум показателям: технологичности бетонной смеси и прочности на сжатие бетона.

Требования к технологичным характеристикам бетонных смесей заключались в соответствии марки по удобоукладываемости (П4-П5), пористости и плотности смеси, отсутствии признаков расслоения и водоотделения.

Результаты технологических показателей лабораторных замесов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний бетонных смесей

Показатели свойств бетонной смеси	Количество исследуемой добавки на основе наноструктурированных материалов, % от массы цемента			Количество добавки-аналога, % от массы цемента
	0,3 %	0,4 %	0,6 %	0,6 %
Водоцементное отношение	0,46	0,48	0,45	0,53
Расход вяжущего, кг/м ³	400	400	400	400
Подвижность бетонной смеси ОК, см	22	22	23	20
Марка по удобоукладываемости	П5	П5	П5	П4
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м ³	2335	2451	2446	2411
Признаки расслаиваемости	отсутствуют	отсутствуют	незначительные	отсутствуют

Анализ полученных результатов показывает, что все смеси соответствуют предъявляемым к ним требованиям. Количество вводимой воды регулировали достижением необходимой марки по удобоукладываемости бетонной смеси, что оценивалось осадкой стандартного конуса (ОК) (рис. 1). Исследуемая добавка относительно добавки-аналога показала больший редуцирующий эффект, что яв-

но видно по водоцементному отношению и показателю ОК. Следует заметить, что при количестве исследуемой добавки 0,3 % плотность смеси падает, а при 0,6 % наблюдаются незначительные признаки расслаиваемости [3-5]. Таким образом, по технологическим признакам наиболее приемлемой дозировкой добавки на основе наноструктурированных материалов является 0,4 % от массы цемента.

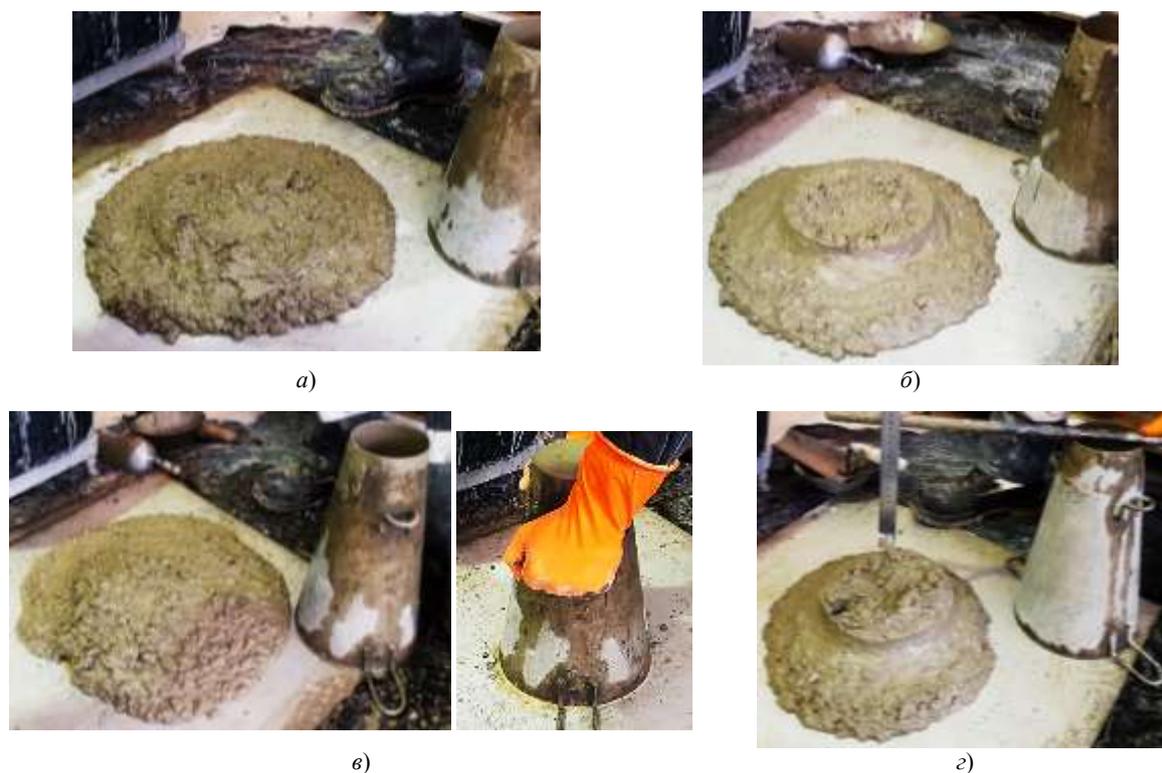


Рис. 1. Бетонные смеси с количеством (% от массы вяжущего) наномодифицированной добавки: а – 0,4 %; б – 0,3 %; в – 0,6 %; г – добавка-аналог 0,6 %

Пористость бетонной смеси контролировали порометром КП-133 по ГОСТ 10181 (рис. 2).

Для бетонной смеси с количеством наномодифицированной добавки 0,4 % показатель

пористости составил 2,81 %, что является допустимым для данного типа смесей.

Прочность на сжатие контролировали по образцам-кубам $100 \times 100 \times 100$ мм, изготов-

ленным из лабораторных замесов, при оценке технологических свойств смесей. Результаты испытаний на прочность при сжатии кубов представлены на рисунках 3, 4.



Рис. 2. Прибор поромер КП-133

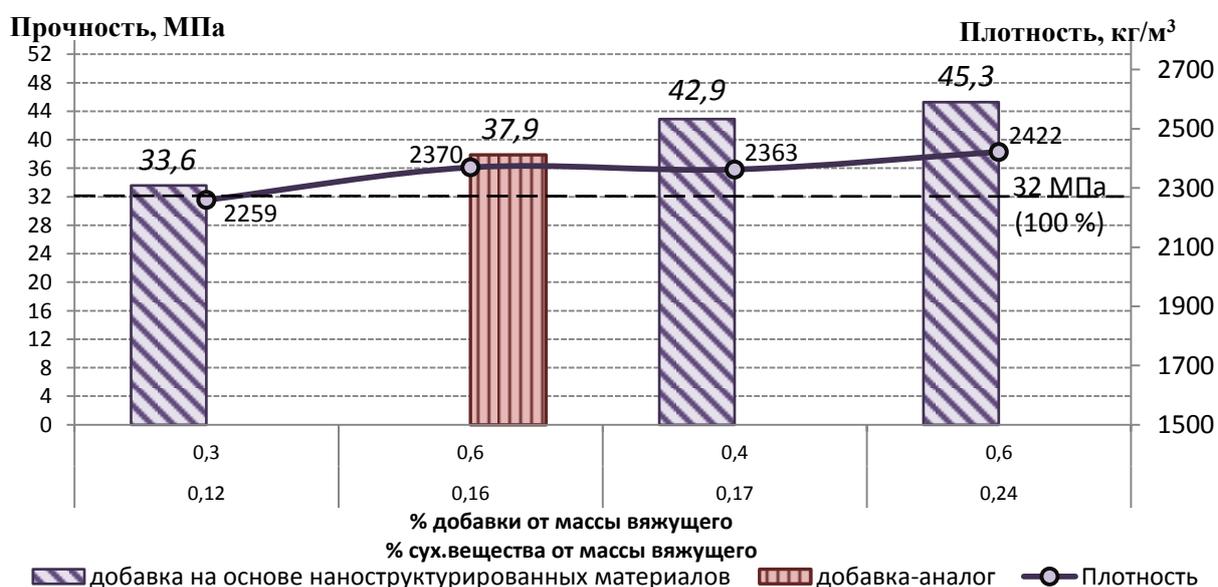


Рис. 3. Прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток

По сравнению с требуемой прочностью на сжатие при подборе составов в возрасте 28 суток согласно ГОСТ 18105 и СТБ 1544 для класса бетона С20/25 прочность на сжатие составила 32,0 МПа (100 %). Все составы набрали необходимую прочность. Наиболь-

ший запас прочности бетона на сжатие с исследуемой добавкой составил 13,3 МПа (42 %) при ее концентрации 0,6 % от массы вяжущего, что на 20 % выше, чем прочность бетона с добавкой-аналогом. При расходе добавки 0,4 % от массы цемента прочность

немного ниже и составляет 42,9 МПа, что на 10,9 МПа (34 %) выше требуемой и на 13 % (37,9 МПа).

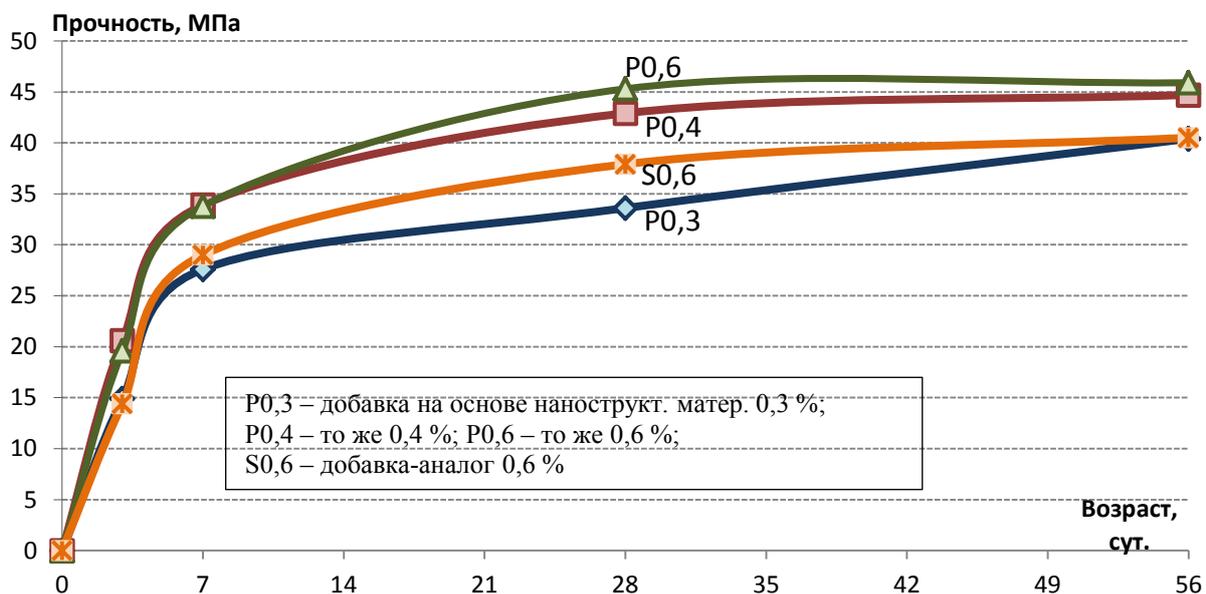


Рис. 4. График набора прочности бетона

Так как при концентрации добавки 0,6 % от массы цемента отмечали незначительные признаки расслаивания, а при 0,4 % наблюдали запас прочности, соответствующий требуемой и выше, то рекомендуемый расход добавки на основе наноструктурированных материалов – 0,4-0,6 % от массы вяжущего. Данный состав соответствует технологическим требованиям бетонной смеси и показателям прочности бетона в образцах.

Для установления соответствия марки бетона требуемой морозостойкости (F200) использовали ускоренный метод при много-

кратном замораживании и оттаивании (третий) согласно ГОСТ 10060. Результаты испытаний бетонных образцов показали соответствие предъявляемым к ним требованиям по морозостойкости F200. Снижение средней прочности на сжатие испытываемых образцов на циклическое замораживание и оттаивание по сравнению с контрольными образцами, насыщенными соевым раствором, составляет 5 %. Условие соотношения нижних границ доверительных интервалов выполняется с запасом прочности 7,2 % (32,6 МПа > 30,4 МПа) (рис. 5).



Рис. 5. Испытание бетонных образцов на морозостойкость

Водонепроницаемость бетона определяли двумя методами: косвенным и прямым. Согласно косвенному методу марка бетона по водонепроницаемости (W) устанавливается по показателю сопротивления бетона прониканию воздуха m_i ($\text{с}/\text{см}^3$). Испытания проводятся на образцах-цилиндрах размером 150×150 мм по ГОСТ 12730.5 с использованием устройства типа «Агама-2РМ» (рис. 6,а) и герметизирующей мастики, удовлетворяющей ГОСТ 14791.

Прямой метод (по «мокрому пятну») определения марки бетона по водонепроницаемости (W) заключается в установлении максимального давления воды, при котором еще не наблюдается ее просачивание через образец. Испытания проводятся на образцах-цилиндрах 150×150 мм по ГОСТ 12730.5. Для проведения испытаний применяется установка УВБ-МГ4 (рис. 6,б), конструкция которой обеспечивает определение водопроницаемо-

сти по методу «мокрого пятна» в автоматическом режиме.

Значения сопротивления бетона прониканию воздуха в образцах, полученные косвенным методом, указывают на высокую марку бетона по водонепроницаемости $W20$ ($m_i = 62,2; 89,1; 96,8; 97,4; 117,2; 177,5 \text{ с}/\text{см}^3$). Испытания бетонных образцов прямым методом на данном типе установки (максимальное создаваемое давление 1,2 МПа на всех образцах) показывают максимально возможную марку по водонепроницаемости $W12$. Следовательно, прямой метод испытаний подтверждает достаточно высокую марку бетона по водонепроницаемости $W12$.

Данный состав бетона с добавкой на основе наноструктурированных материалов можно рекомендовать для конструкций и сооружений с повышенными требованиями по водонепроницаемости.



Рис. 6. Испытание бетонных образцов на водонепроницаемость:
а – устройством типа «Агама-2РМ», б – установкой УВБ-МГ4

Испытания бетона на прочность при осевом растяжении согласно ГОСТ 10180 проводили в разрывной машине Controls 70-C0820/C (рис. 7). Образцы размером $70 \times 70 \times 280$ мм нагружали до разрушения при постоянной скорости нарастания

нагрузки. Контролировали место разрушения образца – рабочую зону, а также плоскость разрушения образца (наклон к вертикальной плоскости должен быть не более 15°). Прочность бетона определяли как среднеарифметическое значение прочности

испытанных образцов в серии из трех образцов – по двум образцам с наибольшей

прочностью. Результаты испытаний представлены в таблице 3.



Рис. 7. Испытанные на осевое растяжение образцы призмы 70×70×280 мм

Таблица 3

Результаты испытаний на осевое растяжение

Наименование объекта испытаний	Масштабный коэффициент	Разрушающая нагрузка, Н	Площадь рабочего сечения образца, мм ²	Прочность образца на осевое растяжение R_b , МПа	Прочность бетона в серии образцов R_m , МПа
Образцы бетона тяжелого (призмы 70×70×280 мм)	0,85	11080	4900	1,92	2,02
		12230	4900	2,12	
		10840	4900	1,88	

Для испытаний на прочность на растяжение при изгибе согласно ГОСТ 10180 образец-призму 100×100×400 мм устанавливали в испытательную машину Controls 70-C0820/C по схеме, приведенной на рисунке 8, и нагружали до разрушения при постоянной скорости нарастания нагрузки.

Контролировалось место разрушения образца – среднюю треть пролета, а также плоскость разрушения образца (наклон к вертикальной плоскости должен быть не более 15°).

Для испытания бетона на раскалывание и сжатие использовали цилиндры 150×150 мм, изготовленные для испытаний на водонепро-

ницаемость. Испытания проводили по ГОСТ 10180. При испытании на сжатие образцы-цилиндры устанавливали нижней гранью на нижнюю опорную плиту испытательной машины (пресса) центрально относительно его продольной оси, используя риски, нанесенные на плиту в виде окружности. Верхнюю грань (формовочная) корректировали шлифованием при наличии неровностей и перепадов (рис. 9).

При испытании на раскалывание образцы-цилиндры зажимали плитами пресса по боковым граням. По нанесенным меткам контролировали совпадение оси приложения нагрузки с осью диаметра образца (рис. 10).

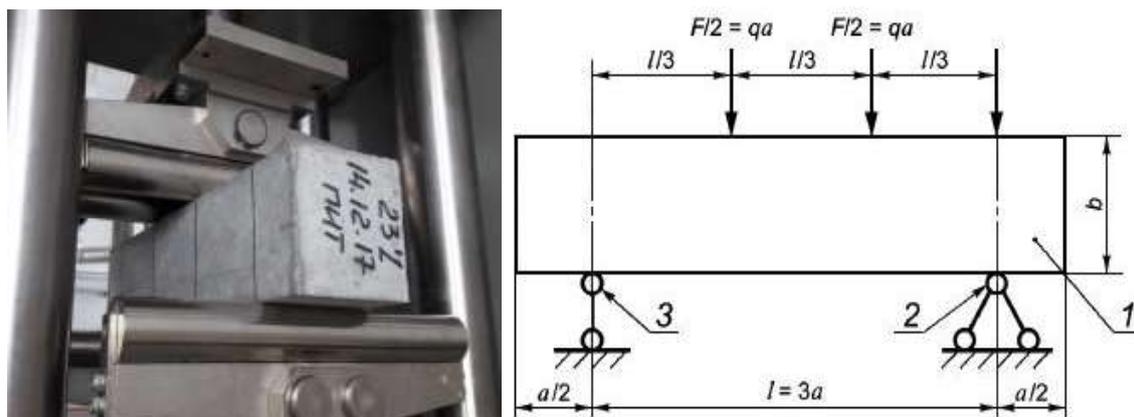


Рис. 8. Схема испытания на растяжение при изгибе:
 a, b – ширина и высота образца; F – нагрузка; q – распределенная нагрузка; l – пролет;
 1 – образец; 2 – шарнирно-неподвижная опора; 3 – шарнирно-подвижная опора

Таблица 4

Результаты испытаний на прочность на растяжение при изгибе

Наименование объекта испытаний	Масштабный коэффициент	Разрушающая нагрузка, Н	Ширина поперечного сечения призмы, мм	Высота поперечного сечения призмы, мм	Расстояние между опорами, мм	Прочность образца R_{fb} , МПа	Прочность бетона в серии образцов R_m , МПа
Образцы бетона тяжелого (призмы 100×100×400 мм)	0,92	13190	100	100	300	3,64	3,83
		14550	100	100	300	4,02	

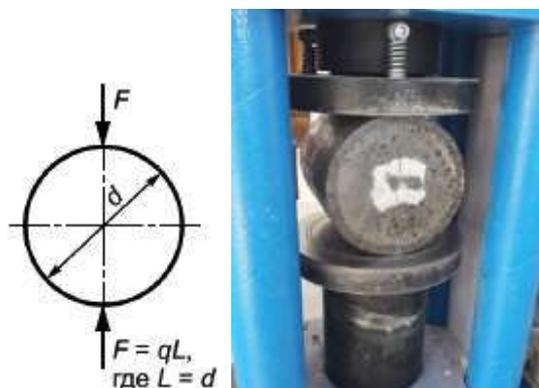


Рис. 9. Схема испытания образцов-цилиндров на растяжение при раскалывании



Рис. 10. Схема испытания образцов-цилиндров на сжатие

Таблица 5

Результаты испытаний цилиндров на раскалывание и сжатие

Наименование объекта испытаний, показатели, технические требования	Разрушающая нагрузка при раскалывании, кН	Разрушающая нагрузка при сжатии, кН
Образцы бетона тяжелого (цилиндры 150×150 мм)	116,76	752,21
	130,95	556,54
	93,26	632,88
Среднее значение, кН	123,86	692,55
Площадь рабочего сечения образца, мм ²	22500	17671
Прочность, МПа	5,5	39,2

Вывод. Результаты проведенных испытаний показывают, что бетон с наноструктурированной добавкой позволяет приготовить смесь, соответствующую всем предъявляемым к ней технологическим требованиям.

В сравнении с добавкой-аналогом проч-

ность на сжатие бетона возрастает на 13 % при одинаковом расходе всех компонентов. Бетон с наномодифицированной добавкой соответствует требованиям по морозостойкости, водонепроницаемости, показывает хорошие результаты на прочность при растяжении в различных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы / С. А. Жданок, Б. М. Хрусталева, Э. И. Батынский, С. Н. Леонович // Наука и техника. 2009. № 3. С. 5-22.
3. Наномодифицированный бетон / Б. М. Хрусталева, В. Н. Яглов, Я. Н. Ковалев, В. Н. Романюк, Г. А. Бурак, А. А. Меженцев, Н. С. Гуриненко // Наука и техника. 2015. № 6. С. 3-8.
4. Бетон с добавкой наноструктурированного углерода: физико-механические характеристики / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Е. А. Коледа, Н. А. Будревич // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. Новополоцк, 2018. С. 173-178.
5. Технологические свойства самоуплотняющегося бетона: влияние добавки наноструктурированного углерода / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Е. А. Коледа, Н. А. Будревич // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. Новополоцк, 2018. С. 168-172.

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

ПОЛОНИНА Елена Николаевна – аспирант кафедры «Технология строительного производства», магистр технических наук, Белорусский национальный технический университет, г. Минск. Область научных интересов – бетоны, модифицированные наноструктурированным углеродом. E-mail: grushevskaya_en@tut.by

БУДРЕВИЧ Нелли Анатольевна – магистрант кафедры «Технология строительного производства», Белорусский национальный технический университет, г. Минск. Область научных интересов – бетоны, модифицированные графеном. E-mail: nellibudrevich@yandex.by

UDC 624.012

E. A. Koleda¹, S. N. Leonovich², S. A. Zhdanok³, E. N. Polonina¹, N. A. Budrevich¹¹Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus),²Belostok Technical University (Belostok, Poland),³National Academy of Sciences of the Republic of Belarus (Minsk)

Abstract. The main problem of modern building materials include obtaining high-quality concretes. The solution of this problem can be carried out, first of all, by modifying the structure of the cement stone, ensuring a greater degree of utilization of the strength potential of crystalline hydrates, improving the quality of joint work of all the components of concrete. One of the promising areas of research in improving the quality of concrete is the implementation of nanotechnology in their production. According to various studies, carbon nanotubes are identified as the most promising type of modifier, allowing you to create materials with significantly improved properties. On the basis of modern principles of structure modification, building composite materials are produced with enhanced strength and durability characteristics. The reduction of the water-cement ratio with the introduction of super- and hyperplasticizers, the use of ultra-fine, nanostructuring and complex additives allow, in the first place, to compact the structure of the cement stone, and as a result, the structure of the composite as a whole.

This article presents the results of the study of the physicomechanical properties of concrete of medium compressive strength, prepared with a plasticizing additive based on nanostructured carbon: compressive strength, axial tensile strength, flexural tensile strength, tensile strength, and such indicators durability as frost resistance and water resistance. Its influence on the technological properties of the concrete mix was evaluated: the mobility of the concrete mix, the air entrainment of the concrete mix, density, stratification. The optimal consumption of plasticizer modified with nanocarbon has been established. An increase in compressive strength was found in comparison with an additive equivalent of 13 % with the same consumption of components. As a result of the tests carried out, the optimal dosage of the carbon nanostructured additive and its influence on the properties of concrete mixtures were established and the physicomechanical properties of the resulting concrete were evaluated. To determine them, standard test methods were used, as set out in the relevant regulatory documents.

Keywords: concrete; nanobeton; nanotubes; nanostructured carbon; plasticizer; concrete strength; concrete frost resistance; concrete water resistance; concrete tensile strength.

REFERENCES

1. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khrustalev B. M., Koleda E. A. Povyshenie prochnosti betona plastificiruyushchej dobavkoj na osnove nanostrukturirovannogo ugleroda [Increasing the strength of concrete with a plasticizing additive based on nanostructured carbon], *Stroitel'nye materialy* [Construction materials], 2018, No. 6, pp. 67-72.
2. Zhdanok S. A., Khrustalev B. M., Batyanovskiy E. I., Leonovich S. N. Nanotekhnologii v stroitel'nom materialovedenii: real'nost' i perspektivy [Nanotechnologies in building materials science: reality and prospects], *Nauka i tekhnika* [Science and technology], 2009, No. 3, pp. 5-22.
3. Khrustalev B. M., Yaglov V. N., Kovalev Ya. N., Romanyuk V. N., Burak G. A., Mezhtentsev A. A., Gurinenko N. S. Nanomodificirovannyj beton [Nanomodified concrete], *Nauka i tekhnika* [Science and technology], 2015, No. 6, pp. 3-8.
4. Polonina E. N., Leonovich S. N., Koleda E. A., Budrevich N. A. Beton s dobavkoj nanostrukturirovannogo ugleroda: fiziko-mekhanicheskie harakteristiki [Concrete with the addition of nanostructured carbon: physicomechanical characteristics], *Arhitekturno-stroitel'nyj kompleks: problemy, perspektivy, innovacii: ehlektronnyj sbornik statej mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 50-letiyu Polockogo gosudarstvennogo universiteta* [Architectural and building complex: problems, prospects, innovations: an electronic collection of articles of the international scientific conference dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University], Novopolotsk, April 5–6. 2018, Novopolotsk, 2018, pp. 173-178.

5. Polonina E. N., Leonovich S. N., Koleda E. A., Budrevich N. A. Tekhnologicheskie svoystva samouplotnyayushchegosya betona: vliyanie dobavki nanostrukturirovannogo ugleroda [Technological properties of self-compacting concrete: the effect of the addition of nanostructured carbon], *Arhitekturno-stroitel'nyj kompleks: problemy, perspektivy, innovacii: ehlektronnyj sbornik statej mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 50-letiyu Polockogo gosudarstvennogo universiteta* [Architectural and building complex: problems, prospects, innovations: electronic collection of articles of the international scientific conference dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University], Novopolotsk, 5–6 April. 2018, Novopolotsk, 2018, pp. 168-172.

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

POLONINA Elena Nikolaevna – Graduate Student of the Department "Technology of construction production", Master of Technical Sciences, Belarusian National Technical University, Minsk. The area of scientific interests is concretes modified by nano-structured carbon. E-mail: grushevskay_en@tut.by

BUDREVICH Nelli Anatolyevna – Master Student of the Department "Technology of construction production", Belarusian National Technical University, Minsk. His research interests are graphene modified concretes. E-mail: nellibudrevich@yandex.by

Библиографическая ссылка

Физико-механические свойства бетона средней прочности модифицированного углеродной наноструктурированной добавкой / Е. А. Коледа, С. Н. Леонович, С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, Н. А. Будревич // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2(6). – С. 24-34.