

---

## ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ – ПРОИЗВОДСТВУ

### REDUCTION OF ADVANCES IN SCIENCE TO PRACTICE

Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 145–160.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2021; (11): 145–160.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.555

DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-145-160

#### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТА

Валентин Анатольевич Ушков<sup>1</sup>, Григор Виленович Налбандян<sup>1</sup>,  
Дмитрий Александрович Зорин<sup>1</sup>, Евгений Валерьевич Королев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

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

**Аннотация.** Рассмотрено влияние условий обработки сырьевых компонентов (цемента, кварцевого песка и воды затворения) низкотемпературной неравновесной плазмой, применение дисперсного армирования (стеклянные и базальтовые волокна, волокна из полипропилена, стальная фибра и фибра из структурированного ферромагнитного микропровода) и водной суспензии нанокристаллической целлюлозы на прочность ремонтных составов. Показано, что совместное применение рассмотренных выше способов модификации сырьевых компонентов позволяет повысить прочность ремонтных цементных составов на 35–45 %.

**Ключевые слова:** вода затворения, кварцевый песок, нанокристаллическая целлюлоза, плазменная обработка, прочность, ремонтный состав, фибра

**Для цитирования:** Ушков В.А., Налбандян Г.В., Зорин Д.А., Королев Е.В. Оценка эффективности различных способов повышения эксплуатационных характеристик цемента // Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 145–160. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-145-160.

Original article

#### EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF VARIOUS WAYS TO IMPROVE THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF CEMENT

Valentin A. Ushkov<sup>1</sup>, Grigor V. Nalbandyan<sup>1</sup>, Dmitry A. Zorin<sup>1</sup>, Evgeny V. Korolev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

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

---

© Ушков В.А., Налбандян Г.В., Зорин Д.А., Королев Е.В., 2021

**Abstract.** The article considers the influence of the processing conditions of raw materials components (cement, quartz sand and sealing water) with low-temperature nonequilibrium plasma, the use of dispersed reinforcement (glass and basalt fibers, polypropylene fibers, steel fiber and fiber from structured ferromagnetic micro-pipe) and aqueous suspension of nanocrystalline cellulose on the strength of repair compositions. It is shown that the combined use of the above methods of modification of raw materials components allows to increase the strength of repair cement compositions in 35–45 %.

**Keywords:** sealing water, quartz sand, nanocrystalline cellulose, plasma treatment, strength, repair composition, fiber

**For citation:** Ushkov V.A., Nalbandyan G.V., Zorin D.A., Korolev E.V. Evaluation of the effectiveness of various ways to improve the performance characteristics of cement. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; (11): 145–160. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-145-160.

**Введение.** Одним из активно развивающихся направлений в строительном материаловедении является повышение эксплуатационных свойств мелкозернистых бетонов и ремонтных составов на основе портландцемента. Увеличение физико-механических свойств строительных композитов достигается чаще всего активацией сырьевых компонентов [1–9], дисперсным армированием [10–15] или применением различных наноразмерных добавок [16–20]. Так, механохимическая активация цемента повышает его удельную поверхность и приводит к аморфизации поверхностного слоя частиц. Механохимическую активацию цемента проводят в аппаратах вихревого слоя или с помощью вибромельниц различной конструкции. Механохимическую активацию кварцевого песка осуществляют в центробежно-планетарных мельницах, а также в аппаратах вихревого слоя. Вопросы активации воды затворения подробно рассмотрены в работах [3, 5]. Особый интерес вызывает плазменная модификация сырьевых компонентов (цемента, кварцевого песка и воды затворения) для повышения эксплуатационных свойств цементных материалов, в частности, ремонтных составов [21–24].

В качестве фибры для производства мелкозернистых бетонов и ремонтных составов широко используют резаные волокна различной химической природы диаметром от 10–15 мкм до 0,7–0,9 мм и длиной до 50 мм. Чаще всего для этих целей применяют металлическую (стальную), полимерную (полипропиленовую, полиэтилентерефталатную или стеклокомпозитную), минеральную (стеклянную или базальтовую) и растительную (целлюлозную) фибру. Фибра придает цементным композитам повышенную стойкость к ударным нагрузкам и высокую прочность при растяжении и изгибе, снижает усадку и трещинообразование мелкозернистых бетонов и строительных растворов в процессе твердения. Эффективность фибры при этом зависит от химической природы волокна, из которого она изготовлена, и, следовательно, адгезии волокна к цементному камню, диаметра и длины фибры, объемного содержания и распределения ее в минеральной матрице [10–15].

Для повышения физико-механических характеристик строительных композитов на основе цемента широко используют ультра- и нанодобавки различной химической природы [16–20]. При этом большой интерес вызывает

ет применение нанодобавок фуллероидного строения, максимальный размер которых не превышает нескольких сотен нанометров. Они представляют собой особую форму углерода. Среди нанодобавок особое место занимает наноцеллюлоза (НЦ) сферической или игольчатой формы, которую используют в виде водной суспензии, позволяющей сохранить характерные особенности наноцеллюлозы. Наноцеллюлозу получают путем кислотного гидролиза микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) или волокон хлопковой целлюлозы в 61–65%-м растворе  $H_2SO_4$  при температуре 25–50 °С с последующей высокочастотной обработкой в ультразвуковом поле (УЗ-диспергирование). Концентрация НЦ в водной суспензии достигает 5 %. При кислотном гидролизе волокна МКЦ или хлопковой целлюлозы разрушаются на наноразмерные частицы. Подбором соответствующих условий гидролиза синтезируют НЦ с различными физико-химическими свойствами в зависимости от типа волокон целлюлозы и места разрыва макроцепи, что и определяет реакционную активность частиц наноцеллюлозы. Реологические свойства водных суспензий сферической (аморфная структура) и игольчатой (кристаллическая структура) формы частиц НЦ при температуре 25–70 °С детально исследованы в работе [25], а структуру и морфологию наноцеллюлозы, используемой в качестве микродобавки для строительных композитов, в [26]. Влияние НЦ на процесс гидратации цемента и свойства цементных композитов рассмотрены в [26–29].

Следует отметить, что в рассмотренных публикациях основное внимание авторами уделено повышению физико-механических свойств мелкозернистых бетонов. Поэтому представлялось интересным сопоставить эффективность рассмотренных выше методов улучшения технологических свойств и увеличения эксплуатационных характеристик цементных композитов применительно к ремонтным строительным растворам, используемым при восстановлении и ремонте коммуникационных коллекторов.

**Материалы и методики исследования.** Для изготовления составов использовали портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н (ГОСТ 31108–2016), фракционированный кварцевый песок I класса (ГОСТ 8736–2014), состоящий из фракций 0,5 и 1,5 мм, и воду затворения (ГОСТ 23732–2011). Фракционированный кварцевый песок способствует образованию более плотной упаковки частиц в затвердевшем строительном композите, повышает водоудерживающую способность. Цемент, кварцевый песок и воду затворения обрабатывали в низкотемпературной неравновесной плазме (НТНП) в проточном режиме на лабораторной установке по методике работы [24]. В качестве фибры использовали полипропиленовую, стальную, стеклянную, базальтовую фибру и фибру из структурированного ферромагнитного микропровода (СФМП), физико-механические свойства которой приведены в табл. 1. Для изготовления фибры применяли стеклянное щелочестойкое волокно производства компании «Owens Corning» (Испания), базальтовое волокно производства компании ООО «Альянс-Строительные Технологии», полипропиленовое волокно производства компании ООО «Фибра Люкс».

Образцы, изготовленные из ремонтных строительных растворов, твердели в нормальных тепловлажностных условиях. Прочность образцов ремонт-

Таблица 1. Физико-механические свойства фибры, использованной в работе  
Table 1. Physical and mechanical properties of the fiber used in the work

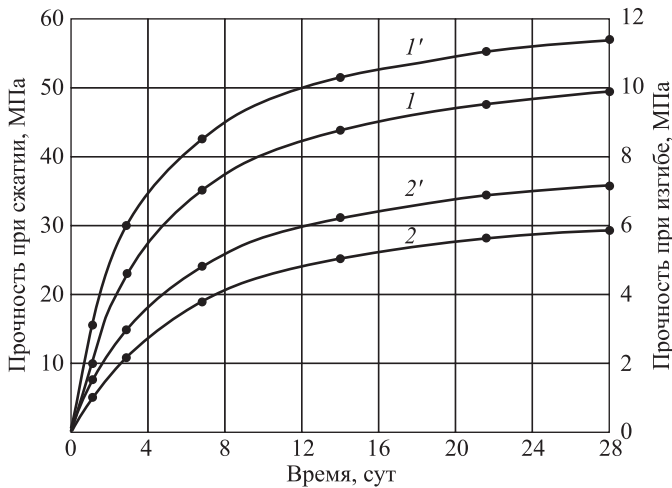
Фибра	Размеры фибры		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Модуль упругости при растяжении, ГПа
	длина, мм	диаметр, мкм				
Стальная	15	300	7800	1870	3,6	200,6
Стекланная	6	14	2680	2500	2,5	72,4
Базальтовая	6	16	2670	2200	2,5	76,9
Полипропиленовая марки ВСМ 6(0,6)	6	20	910	240	212	3,8
Фибра из СФМП	10	15,2	7300	3500	3,2	154,7

ных строительных растворов при сжатии, изгибе и растяжении определяли через 1, 3, 7, 14 и 28 сут их твердения с помощью гидравлического пресса Instron 3382 и разрывной машины WDW-100E по ГОСТ 5802–86, а сроки схватывания – по ГОСТ Р 56587–2015.

**Результаты исследования.** Обработка портландцемента НТНП в проточном режиме практически не влияет на его минералогический состав, незначительно снижает (на 3,7 %) максимальный размер и повышает (на 4,3 %) концентрацию частиц вяжущего размером менее 2 мкм, увеличивает на 4 % удельную поверхность портландцемента. Это уменьшает нормальную плотность цементного теста (с 0,3 до 0,26), повышает (на 35,7 %) суммарное тепловыделение при гидратации портландцемента, сокращает сроки начала и окончания схватывания (соответственно с 60 и 180 до 15 и 60 мин). Одновременно возрастает (на 16,2–20,4 %) прочность цементного камня (рис. 1) и на 18,1–22,3 % цементно-песчаного раствора на его основе.

Обработка кварцевого песка НТНП снижает на 10,6–20,3 % удельную поверхность его зерен и на 8,4–14,1 % площадь поверхности пор. При этом существенное уменьшение площади поверхности пор и удельной поверхности кварцевого песка происходит с ростом размера его зерен, что обусловлено оплавлением их поверхности при взаимодействии со стримером. При обработке кварцевого песка НТНП происходит аморфизация поверхности его частиц. Обработка кварцевого песка НТНП повышает и физико-механические свойства цементно-песчаных растворов. Так, прочность при сжатии образцов, твердевших 28 сут в нормальных условиях, выше прочности контрольных образцов на 20,4 % (с 23,5 до 28,3 МПа) при использовании кварцевого песка, прошедшего однократную плазменную обработку, а при двух- и трехкратной обработке кварцевого песка НТНП прочность указанных составов возрастает соответственно на 13,3 и 17 %, т.е. до 33,1 и 38,2 МПа (рис. 2).

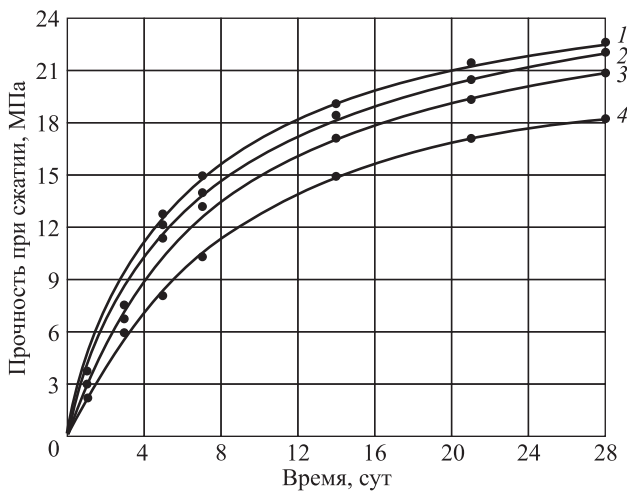
Однократная обработка воды затворения НТНП повышает прочность при сжатии цементно-песчаных растворов на 13,5 % (с 18,5 до 21,1 МПа) по сравнению с контрольным составом. Вода затворения, прошедшая двух- и трехкратную обработку в проточном режиме в установке НТНП, увеличивает



*Рис. 1.* Зависимость прочности цементного камня при сжатии (*I, I'*) и изгибе (*2, 2'*) от продолжительности твердения портландцемента  
*I, 2* – цемент марки ЦЕМ I 42,5Н; *I', 2'* – цемент марки ЦЕМ I 42,5Н после обработки НТНП

*Fig. 1.* Dependence of the strength of cement stone under compression (*I, I'*) and bending (*2, 2'*) on the duration of hardening of Portland cement

*I, 2* – cement grade CEM I 42,5N; *I', 2'* – cement grade CEM I 42,5N after treatment of NTNP



*Рис. 2.* Прочность цементно-песчаных растворов в зависимости от кратности плазменной обработки кварцевого песка

*1, 2, 3* – трех-, двух- и однократная обработка соответственно;  
*4* – контрольный состав

*Fig. 2.* Strength of cement-sand solutions depending on the multiplicity of plasma treatment of quartz sand

*1, 2, 3* – three-, two- and one-time treatment respectively;  
*4* – control composition

прочность при сжатии ремонтных составов на 4,5–6 %. Совместное применение необработанной и плазмомодифицированной воды затворения в соотношении 1:1 более существенно повышает прочность цементно-песчаных растворов за счет образования мелкокристаллической структуры затвердевших строительных растворов.

Совместное применение обработанной НТНП воды затворения и плазмомодифицированного кварцевого песка приводит к синергическому эффекту в повышении прочности строительных растворов (рис. 3). Указанное следует не только из сопоставления прочности образцов, но и анализа эмпирических коэффициентов кинетического уравнения [30]

$$R(t) = R_{\max}(1 - e^{-\alpha t^n}),$$

где  $R_{\max}$  – максимальная прочность;  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий скорость набора прочности;  $n$  – структурный коэффициент (значения эмпирических коэффициентов приведены в табл. 2).

Данные табл. 2 демонстрируют:

1. Различные механизмы влияния на структурообразование цементного камня компонентов, обработанных в НТНП. Указанное следует из сопоставления величин коэффициентов  $\alpha$  для составов № 2–5. Так, для контрольного состава и составов, содержащих обработанные НТНП дисперсные компоненты (портландцемент или кварцевый песок), величина коэффициента  $\alpha$  изменяется в диапазоне 12–16. При добавлении воды затворения, частично содержащей воду, обработанную в НТНП (состав № 2), величина  $\alpha$  снижается до 7,5. Причем аналогичное значение  $\alpha$  характерно и для состава № 1.

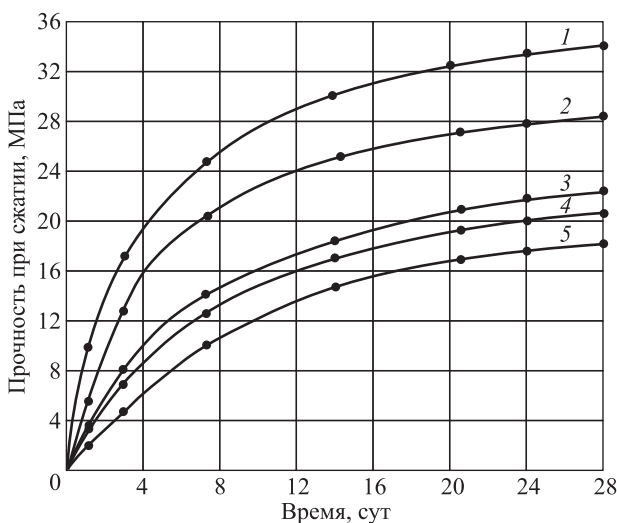


Рис. 3. Динамика набора прочности цементно-песчаных растворов.

Усл. обозн. см. в табл. 2

Fig. 3. Dynamics of strength gain of cement-sand mortars  
See Table 2 for the symbols

Таблица 2. Значения эмпирических коэффициентов кинетического уравнения  
Table 2. Values of empirical coefficients of the kinetic equation

№ состава	Состав	Эмпирические коэффициенты		
		$R_{\max}$	$\alpha$	$n$
1	Раствор на основе кварцевого песка, прошедшего 2-кратную обработку НТНП и воды затворения, состоящей из смеси необработанной и плазмомодифицированной воды при их соотношении, равном 1:1	38,5	7,43	1,69
2	Раствор на основе воды затворения, состоящей из смеси необработанной и плазмомодифицированной воды при их соотношении, равном 1:1	30,0	7,39	1,23
3	Раствор на основе кварцевого песка, прошедшего 2-кратную обработку НТНП	30,4	16,18	1,32
4	Раствор на основе плазмомодифицированного портланд-цемента	24,6	12,35	1,20
5	Контрольный состав	23,3	15,83	1,14

2. Величины коэффициентов  $n$  для исследуемых составов с применением компонентов, обработанных в НТНП, возрастают. Однако большее приращение коэффициента  $n$  наблюдается для составов, содержащих обработанные НТНП дисперсные компоненты (составы № 3 и 4).

3. Сопоставление величин коэффициентов  $n$  для составов № 2 и 3 с  $n$  для состава № 1 указывает на взаимное усиление влияния на структурообразование цементного камня компонентов, обработанных в НТНП и находящихся в разных агрегатных состояниях. Причем на величину  $\alpha$  доминирующее влияние оказывает вода затворения, частично содержащая воду, обработанную в НТНП, а на коэффициент  $n$  – обработанные дисперсные компоненты (в частности, кварцевый песок).

Как отмечалось выше, эффективным методом увеличения прочности мелкозернистых бетонов и ремонтных составов является их дисперсное армирование. На рис. 4 приведены зависимости прочности строительных растворов на растяжение при изгибе от вида и объемного содержания металлической, полимерной и природной фибры. Из рис. 4 следует, что применение стальной фибры и фибры из СФМП, базальтовой и стеклянной фибры при их объемном содержании 0,4 % повышает прочность на растяжение при изгибе ремонтных составов соответственно на 74,6; 63,5; 50,8 и 47,6 % (с 6,3 до 11; 10,3; 9,5 и 9,3 МПа), а полипропиленовая фибра – на 34,9 % (до 8,5 МПа). Наблюдаемый эффект обусловлен, по нашему мнению, более высоким модулем упругости ( $M_{упр}$ ) при растяжении металлической фибры по сравнению с природной или полимерной фиброй. Более низкая прочность ремонтных составов, содержащих полипропиленовую фибру, может быть обусловлена и ее низкой адгезией к цементному камню. При этом наблюдается линейная зависимость прочности при изгибе ремонтных составов от величины  $M_{упр}$  фибры (рис. 5).

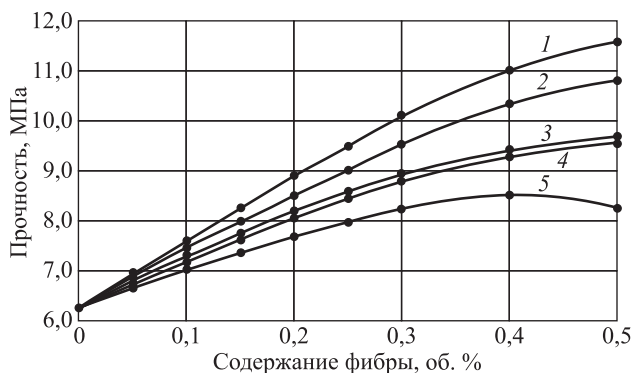


Рис. 4. Зависимость прочности на растяжение при изгибе ремонтного состава от вида и объемного содержания фибры

1 – стальная фибра; 2 – фибра из СФМП; 3 – базальтовая фибра; 4 – стеклянная фибра; 5 – полипропиленовая фибра

Fig. 4. The dependence of the tensile strength during bending of the repair composition on the type and volume content of the fiber

1 – steel fiber; 2 – SFMP fiber; 3 – basalt fiber; 4 – glass fiber; 5 – polypropylene fiber

Эффективность объемного дисперсного армирования ремонтных составов можно оценить при сопоставлении угла наклона прямых, указанных на рис. 5, к оси абсцисс – отношения величины повышения прочности при изгибе ремонтных составов к разнице модулей упругости при растяжении исследованных видов фибры ( $\text{tg}\alpha$ ). Из рис. 6 следует, что величина  $\text{tg}\alpha$  линейно возрастает с повышением степени объемного содержания фибры. Это указывает на аддитивное влияние фибры на прочность материала и на отсутствие

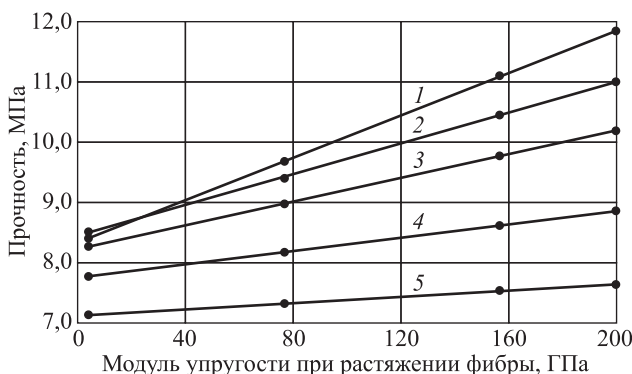


Рис. 5. Зависимость прочности на растяжение при изгибе ремонтного состава от модуля упругости при растяжении фибры и ее объемного содержания

1 – 0,5 %; 2 – 0,4; 3 – 0,3; 4 – 0,2; 5 – 0,1 %

Fig. 5. The dependence of the tensile strength during bending of the repair composition on the elastic modulus during stretching of the fiber and its volume content

1 – 0,5 %; 2 – 0,4; 3 – 0,3; 4 – 0,2; 5 – 0,1 %



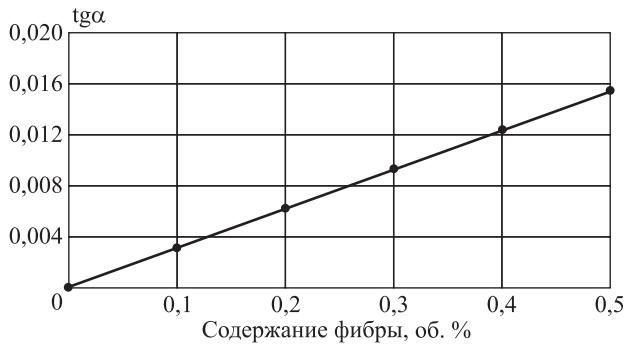


Рис. 6. Зависимость  $tg\alpha$  от объемного содержания фибры в ремонтном составе

Fig. 6. Dependence of  $tg\alpha$  on the volume content of fiber in the repair composition

(или незначительность по величине) взаимодействия в зоне контакта «цементный камень – фибра».

Среди известных наноразмерных добавок особое внимание заслуживает использование нанокристаллической целлюлозы (НКЦ) в виде водных суспензий, содержащих до 4,8 % НКЦ. Установлено, что с увеличением концентрации НКЦ до 0,14 % прочность при изгибе цементного камня и ремонтного состава, имеющего класс по прочности В25 (рис. 7), повышается на 21,3 и 20,3 % (соответственно с 6,1 и 6,4 до 7,4 и 7,7 МПа), а прочность при сжатии (рис. 8) увеличивается на 29,4 и 28,8 % (соответственно с 51,1 и 32,3 до 66,4 и 41,6 МПа).

Оптимальной концентрацией НКЦ в цементных композитах является 0,14–0,16 %. Следует отметить, что с ростом концентрации НКЦ увеличиваются сроки схватывания цементного камня и ремонтных составов. Указанное смещение сроков схватывания может быть обусловлено высокой способностью наноцеллюлозы удерживать воду в смеси. Это приводит к повышению

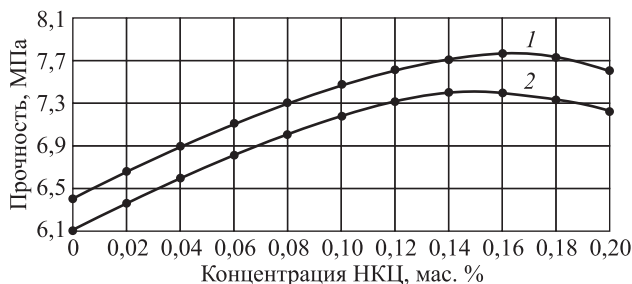


Рис. 7. Зависимость прочности на растяжение при изгибе ремонтного состава (1) и цементного камня (2) после 28 сут твердения в нормальных условиях от концентрации НКЦ

Fig. 7. Dependence of the bending tensile strength of the repair compound (1) and cement stone (2) after 28 days of hardening under normal conditions on the concentration of NCC

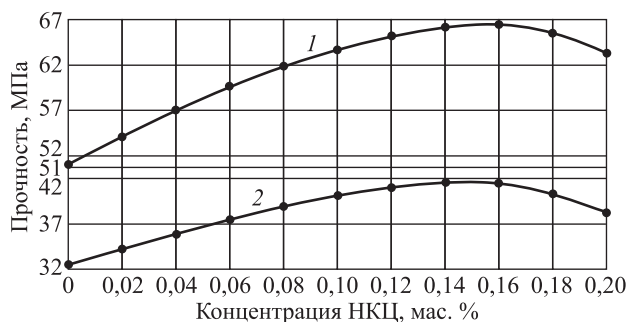


Рис. 8. Зависимость прочности при сжатии после 28 сут твердения в нормальных условиях цементного камня (1) и ремонтного состава (2) от концентрации НКЦ

Fig. 8. Dependence of compressive strength after 28 days of hardening under normal conditions of cement stone (1) and repair composition (2) on the concentration of NCC

степени гидратации портландцемента, снижению пористости и повышению однородности цементного камня. Динамика набора прочности ремонтных составов, модифицированных нанокристаллической и микрокристаллической целлюлозой, приведена на рис. 9.

Увеличение прочности цементного камня и ремонтных составов, модифицированных нанокристаллической целлюлозой, на наш взгляд, обусловлено повышением плотности цементного камня (снижением пористости)

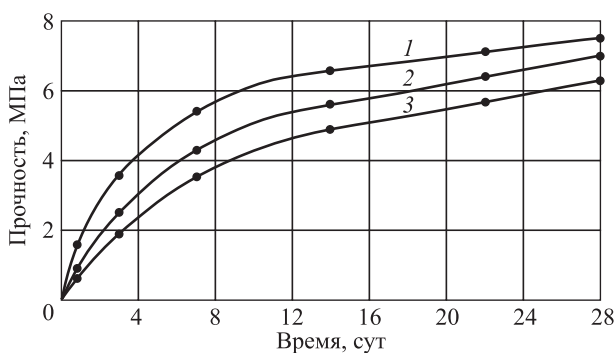


Рис. 9. Динамика набора прочности на растяжение при изгибе ремонтного состава, модифицированного микро- и нанокристаллической целлюлозой

1 – ремонтный состав, содержащий 0,14 % нанокристаллической целлюлозы; 2 – ремонтный состав, содержащий 0,5 % микрокристаллической целлюлозы; 3 – контрольный состав

Fig. 9. Dynamics of the tensile strength set during bending of the repair compound modified with micro- and nanocrystalline cellulose

1 – repair composition containing 0,14 % nanocrystalline cellulose; 2 – repair composition containing 0,5 % microcrystalline cellulose; 3 – control composition

вследствие увеличения степени гидратации портландцемента. При этом значительно возрастает жесткость и хрупкость образцов строительных композитов, а деформации при изгибе линейно снижаются с ростом концентрации нанокристаллической целлюлозы.

**Заключение.** Применение плазменной модификации (обработка в низкотемпературной неравновесной плазме) компонентов цементных композитов приводит к повышению их физико-механических свойств. При этом эффект от введения таким образом модифицированных компонентов зависит от их агрегатного состояния. Обработка в низкотемпературной неравновесной плазме естественно оказывает различное влияние на дисперсные компоненты и воду. Для первых из указанных компонентов цементных композитов наблюдается изменение параметров кристаллической структуры (аморфизация) поверхностного слоя и (или) изменение рельефа поверхности частиц (в частности, для кварцевого песка). Обработка воды приводит к изменению ее жесткости, следствием указанного является замедление процессов структурообразования цементного камня (практически двухкратное уменьшение величины коэффициента  $\alpha$ ). При совместном использовании компонентов, обработанных в НТНП, наблюдается взаимное усиление их влияния на структурообразование цементного камня.

Дисперсное армирование цементных композитов, содержащих плазмомодифицированные компоненты, оказывает закономерное влияние на механические свойства таких материалов, зависящее от вида фибры. Применение наноразмерной целлюлозы позволяет увеличить плотность и однородность структуры цементного камня, что совместно с увеличением степени гидратации портландцемента также обеспечивает повышение прочности разрабатываемых материалов.

#### Список источников

1. *Проконец В.С.* Влияние механоактивационного воздействия на активность вяжущих веществ // Строит. материалы. 2003. № 9. С. 28–29.
2. *Болдырев В.В.* Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. 2006. Т. 75, № 3. С. 203–216.
3. *Баженов Ю.М., Федосов С.В., Ерофеев В.Т. и др.* Цементные композиты на основе магнитно- и электрохимически активированной воды затворения. Саранск: Нац. исслед. Мордов. гос. ун-т им. Н.П. Огарева, 2011. 128 с.
4. *Андреева А.В., Давыдова Н.Н., Буренина О.Н.* Механоактивационная обработка заполнителя для повышения качества мелкозернистого бетона // Политематич. сет. электрон. науч. журн. Кубан. гос. аграр. ун-та. 2014. № 101. С. 413–423.
5. *Абзаев Ю.А., Саркисов Ю.С., Сафронов В.Н. и др.* Влияние цикловой магнитной обработки воды затворения на структурное состояние фаз цементного камня в различные сроки твердения // Вестн. Том. гос. архитектурно-строит. ун-та. 2016. № 1. С. 145–154.
6. *Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Золотых С.В., Канева Е.В.* Микроструктура продуктов гидратации вяжущих композиций, полученных в вихревой струйной мельнице // Вестн. Белгород. гос. технолог. ун-та им. В.Г. Шухова. 2017. № 3. С. 9–18.

7. Кондращенко В.И., Тарарушкин Е.В., Титов С.П., Кондращенко Е.В. Изменение формы частиц цемента при его активации в вихревой мельнице // Будівництва. 2017. Т. 90, № 4. С. 236–239.
8. Малахин С.С., Кривобородов Ю.Р. Повышение свойств портландцемента активацией в водной среде // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34, № 5. С. 53–55.
9. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В. Прочность композитов на основе модифицированного портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя // Пром. и гражд. стр-во. 2021. № 1. С. 35–41.
10. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Изд-во АСВ, 2011. 642 с.
11. Клюев С.В., Лесовик Р.В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон с использованием полипропиленового волокна // Бетон и железобетон. 2011. № 3. С. 7–9.
12. Бучкин А.В., Степанова В.Ф. Мелкозернистый бетон высокой коррозионной стойкости, армированный тонким базальтовым волокном // Пром. и гражд. стр-во. 2013. № 1. С. 47–49.
13. Кузнецова И.С., Рябченкова В.Г., Корнюшина М.П. и др. Полипропиленовая фибра – эффективный способ борьбы со взрывообразным разрушением бетона при пожаре // Строит. материалы. 2018. № 11. С. 15–20.
14. Пустовгар А.П., Абрамова А.Ю., Еремина Н.Е. Эффективность использования дисперсного армирования бетонов и строительных растворов полипропиленовой и базальтовой фиброй // Технология бетонов. 2019. № 7-8. С. 34–42.
15. Соловьев В.Г., Шувалова Е.А., Шаламов В.В. Влияние минерального волокна на стойкость тяжелого бетона к статическим и циклическим нагрузкам // Изв. вузов. Строительство. 2020. № 1. С. 78–86.
16. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Корженко А. и др. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками // Строит. материалы. 2011. № 2. С. 47–51.
17. Фаликман В.Р. Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах // Пром. и гражд. стр-во. 2013. № 1. С. 31–34.
18. Королев Е.В. Нанотехнология в строительном материаловедении. Анализ состояния и достижений. Пути развития // Строит. материалы. 2014. № 11. С. 47–78.
19. Гусев Б.В. Наноструктурирование бетонных материалов // Пром. и гражд. стр-во. 2018. № 1. С. 7–9.
20. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Никитин В.А., Летенко Д.Г., Староверов В.Д. Модифицирование цементных композитов смешанным наноуглеродным материалом фуллероидного типа // Технология бетонов. 2013. № 12. С. 13–15.
21. Бруяко М.Г., Кравцова Д.В., Юрченко В.В., Соловьев В.Г., Ушков В.А. Влияние обработки сырьевых материалов низкотемпературной неравновесной плазмой на свойства строительных растворов // Строит. материалы. 2014. № 12. С. 68–71.

22. Бруйко М.Г., Кравцова Д.В., Юрченко В.В., Ушков В.А. Влияние плазмохимической обработки воды затвердения на свойства строительных растворов // Пром. и гражд. стр-во. 2014. № 4. С. 45–47.
23. Дарбинян М.С., Глухоедов В.А., Соловьев В.Г., Ушков В.А. Влияние условий обработки низкотемпературной неравновесной плазмой воды затвердения и кварцевого песка на прочность ремонтных строительных растворов // Пром. и гражд. стр-во. 2015. № 4. С. 54–57.
24. Колядин А.Ю., Налбандян Г.В., Соловьев В.Г., Богданова А.А., Ушков В.А. Плазменная модификация компонентов строительных растворов – эффективный метод повышения их эксплуатационных свойств // Вестн. МГСУ. 2019. Т. 14, № 5. С. 548–558.
25. Атаханов А.А., Холмунинов А.А., Мамадиёров Б.Н., Турдикулов И.Х., Ашууров Н.Ш. Реологическое поведение водных суспензий наноцеллюлозы // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2020. Т. 62, № 1. С. 189–194.
26. Матвеева Л.Ю., Мокрова М.В., Хирхасова В.И., Баранец И.В. Исследование методом оптической микроскопии высокого разрешения структуры и морфологии наноцеллюлозы – микродобавки строительных композитов // Вестн. гражд. инженеров. 2021. № 1. С. 109–116.
27. Хирхасова В.И. Влияние наноцеллюлозы на процесс гидратации портландцемента и свойства бетона // Вестн. гражд. инженеров. 2020. № 5. С. 155–160.
28. Ксенофонтова Е.Д., Аубакирова И.У. Применение наноцеллюлозы в цементных растворах // Modern Science. 2021. № 4-5. С. 270–275.
29. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.А., Хирхасова В.И. Целлюлоза в бетоне: новое направление развития строительной нанотехнологии // Строит. материалы. 2020. № 7. С. 39–44.
30. Бобрышев А.Н., Козомазов Р.В., Воронов П.В., Лахно А.В., Туманова Н.Н., Валюхов А.А., Перцев В.Т. Нелинейные эволюционные процессы с линейным отображением // Конденсированные среды и межфазные границы. 2007. Т. 9, № 1. С. 22–25.

#### References

1. Prokopets V.S. The effect of mechanical activation on the activity of astringents. *Stroitel'nyye materialy = Building materials*. 2003; (9): 28–29. (In Russ.).
2. Boldyrev V.V. Mechanochemistry and mechanical activation of solids. *Uspekhi khimii = Advances chemistry*. 2006; 75 (3): 203–216. (In Russ.).
3. Bazhenov Yu.M., Fedosov S.V., Erofeev V.T. et al. Cement composites based on magnetically and electrochemically activated mixing water. Saransk: N.P. Ogarev National Research Mordovian State University, 2011. 128 p. (In Russ.).
4. Andreeva A.V., Davydova N.N., Burenina O.N. Mechanical activation treatment of aggregate for improving the quality of fine-grained concrete. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo universiteta = Polythematic network electronic scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2014; (101): 413–423. (In Russ.).
5. Abzaev Yu.A., Sarkisov Yu.S., Safronov V.N. et al. The effect of cyclic magnetic treatment of sealing water on the structural state of the phases of cement stone in different periods of hardening. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2016; (1): 145–154. (In Russ.).

6. Zagorodnyuk L.Kh., Sumskoy D.A., Zolotykh S.V., Kaneva E.V. Microstructure of hydration products of astringent compositions obtained in a vortex jet mill. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V.G. Shukhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017; (3): 9–18. (In Russ.).
7. Kondrashchenko V.I., Tararushkin E.V., Titov S.P., Kondrashchenko E.V. Changing the shape of cement particles during its activation in a vortex mill. *Budivnitstva*. 2017; 90 (4): 236–239. (In Russ.).
8. Malakhin S.S., Krivoborodov Yu.R. Increasing the properties of Portland cement by activation in an aqueous medium. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = Advances in chemistry and chemical technology*. 2020; 34 (5): 53–55. (In Russ.).
9. Ibragimov R.A., Korolev E.V. Strength of composites based on modified Portland cement, activated in the vortex layer apparatus. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction*. 2021; (1): 35–41. (In Russ.).
10. Rabinovich F.N. Composites based on dispersion-reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction. Moscow, 2011. 642 p. (In Russ.).
11. Klyuev S.V., Lesovik R.V. Disperse-reinforced fine concrete with the use of polypropylene fibres. *Beton i zhelezobeton = Concrete and reinforced concrete*. 2011; (3): 7–9. (In Russ.).
12. Buchkin A.V., Stepanova V.F. Fine concrete high corrosion resistance of reinforced thin basalt fiber. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction*. 2013; (1): 47–49. (In Russ.).
13. Kuznetsova I.S., Rybchenkova V.G., Korniyushina M.P. et al. Polypropylene fiber is an effective way to combat explosive destruction of concrete in case of fire. *Stroitel'nyye materialy = Building Materials*. 2018; (11): 15–20. (In Russ.).
14. Pustovgar A.P., Abramova A.Yu., Eremina N.E. Efficiency of using dispersed reinforcement of concrete and mortar with polypropylene and basalt fiber. *Tekhnologiya betonov = Technology of concrete*. 2019; (7-8): 34–42. (In Russ.).
15. Soloviev V.G., Shuvalova E.A., Shalamov V.V. The influence of mineral fiber on the resistance of heavy concrete to static and cyclic loads. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institution. Construction*. 2020; (1): 78–86. (In Russ.).
16. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzhenko A. et al. Modification of cement concretes with multilayer carbon nanotubes. *Stroitel'nyye materialy = Building Materials*. 2011; (2): 47–51. (In Russ.).
17. Falikman V.R. Nanomaterials and nanotechnologies in modern concretes. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction*. 2013; (1): 31–34. (In Russ.).
18. Korolev E.V. Nanotechnology in building materials science. Analysis of status and achievements. Ways of development. *Stroitel'nyye materialy = Building Materials*. 2014; (11): 47–78. (In Russ.).
19. Gusev B.V. Nanostructuring of concrete materials. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction*. 2018; (1): 7–9. (In Russ.).
20. Pukharenko Yu.V., Aubakirova I.U., Nikitin V.A., Letenko D.G., Staroverov V.D. Modification of cement composites mixed nano-carbon material of the fulleroid type. *Tekhnologiya betonov = Technology of concrete*. 2013; (12): 13–15. (In Russ.).

21. Bruyako M.G., Kravtsova D.V., Yurchenko V.V., Solovyov V.G., Ushkov V.A. The effect of processing raw materials with low-temperature nonequilibrium plasma on the properties of building mortars. *Stroitel'nyye materialy = Building Materials*. 2014; (12): 68–71. (In Russ.).
22. Bruyako M.G., Kravtsova D.V., Yurchenko V.V., Ushkov V.A. Influence of plasma-chemical processing of mixing water on the properties of mortar. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction*. 2014; (4): 45–47. (In Russ.).
23. Darbinyan M.S., Glukhoedov V.A., Soloviev V.G., Ushkov V.A. Influence of the processing conditions of low-temperature nonequilibrium plasma mixing water and quartz sand on the strength repair mortar. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction*. 2015; (4): 54–57. (In Russ.).
24. Kolyadin A.Yu., Nalbandyan G.V., Soloviev V.G., Bogdanova A.A., Ushkov V.A. Plasma modification of the components of the mortar is an effective method to improve their operational properties. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*. 2019; 14 (5): 548–558. (In Russ.).
25. Atakhanov A.A., Kholmuminov A.A., Mamadierov B.N., Turdikulov I.Kh., Ashurov N.Sh. The rheological behavior of aqueous suspensions of nanocellulose. *Vysokomolekulyarnyye soedineniya. Seria A = High-molecular compounds. Series A*. 2020; 62 (1): 189–194. (In Russ.).
26. Matveeva L.Yu., Mokrova M.V., Khirkhasova V.I., Baranets I.V. Study by optical microscopy and high-resolution structure and morphology of nanocellulose – microdosage of building composites. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin of civil engineers*. 2021; (1): 109–116. (In Russ.).
27. Khirkhasova V.I. Influence of nanocellulose on the hydration process of Portland cement and concrete properties. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin of civil engineers*. 2020; (5): 155–160. (In Russ.).
28. Ksenofontova E.D., Aubakirova I.U. Application of nanocellulose in cement solutions. *Modern Science*. 2021; (4-5): 270–275. (In Russ.).
29. Pukharensko Yu.V., Aubakirova I.A., Khirkhasova V.I. Cellulose in concrete: a new direction in the development of construction nanotechnology. *Stroitel'nyye materialy = Building Materials*. 2020; (7): 39–44. (In Russ.).
30. Bobryshev A.N., Kozomazov R.V., Voronov P.V., Lakhno A.V., Tumanova N.N., Valyukhov A.A., Pertsev V.T. Nonlinear evolutionary processes with linear display. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed media and interphase boundaries*. 2007; 9 (1): 22–25. (In Russ.).

#### Информация об авторах

- В.А. Ушков** – доктор технических наук, доцент  
**Г.В. Налбандян** – аспирант  
**Д.А. Зорин** – кандидат технических наук  
**Е.В. Королев** – доктор технических наук, профессор

#### Information about the authors

- V.A. Ushkov** – DSc, Ass. Professor  
**G.V. Nalbandyan** – Post-graduate Student  
**D.A. Zorin** – PhD  
**E.V. Korolev** – DSc, Professor

**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 14.09.2021  
Одобрена после рецензирования 15.10.2021  
Принята к публикации 22.10.2021

The article was submitted 14.09.2021  
Approved after reviewing 15.10.2021  
Accepted for publication 22.10.2021