Плазменная модификация компонентов строительных растворов — эффективный метод повышения их эксплуатационных свойств

А.Ю. Калядин¹, Г.В. Налбандян², В.Г. Соловьев², А.А. Богданова², В.А. Ушков²

¹ ГУП «Москоллектор», 129090, г. Москва, 1-й Колтельский пер., д. 14–16, стр. 4;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрено повышение физико-механических характеристик ремонтных строительных растворов, используемых для восстановления и ремонта строительных конструкций коммуникационных коллекторов за счет применения низкотемпературной неравновесной плазмы (НТНП). Обоснована целесообразность обработки сырьевых компонентов строительных растворов НТНП для повышения их физико-механических характеристик. Проанализировано влияние плазменной модификации исходного сырья на фазовый состав портландцемента, гранулометрический состав песка и свойства растворов. Изучено влияние кратности обработки НТНП кварцевого песка и воды затворения на показатели прочности строительных растворов.

Материалы и методы. В качестве вяжущего использовали портландцемент марок ЦЕМ I 32,5Н и ЦЕМ I 42,5Н, кварцевый песок с $M_k = 0,32$, $M_k = 0,63$ и отдельную фракцию размером менее 0,16 мм. Сроки схватывания и прочностные показатели цементно-песчаных растворов определяли согласно действующим ГОСТам. Гранулометрический состав цемента изучали на микроанализаторе размера частиц Analysette-22. При помощи спектрометра ARL Optim'X исследовали фазовый состав цементного камня, кварцевого песка и цементно-песчаных растворов.

Результаты. Установлено, что плазменная обработка портландцемента в 3–4 раза снижает сроки его схватывания и на 15–17 % уменьшает нормальную плотность цементного теста. Модификация НТНП воды затворения уменьшает ее жесткость, образуя дополнительные центры кристаллизации. Плазмомодифицированная вода затворения повышает скорость твердения цементно-песчаных растворов в начальные сроки до 50 % и до 30 % — на 28 суток твердения. При воздействии НТНП на кварцевый песок уменьшается размер частиц и наблюдается частичный переход кристаллической структуры в аморфную. Это приводит к понижению на 10–18 % водопотребности кварца.

Выводы. Обоснована целесообразность плазменной модификации сырьевых компонентов для повышения физико-механических показателей строительных растворов. Благодаря плазменной модификации сырьевых компонентов повышаются эксплуатационные характеристики строительных растворов, улучшается их качество. Представленный метод плазменной обработки сырьевых компонентов, используемых для приготовления строительных растворов, характеризуется высокой степенью эффективности и удобством в применении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: низкотемпературная неравновесная плазма, строительные растворы, портландцемент, кварцевый песок, вода затворения, циклы обработки, прочность, сроки схватывания

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Калядин 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 // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 5. С. 548–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.548-558

Plasma modification of construction mortar components, an efficient method of increasing their performance

Anton Yu. Kalyadin¹, Grigor V. Nalbandyan², Vadim G. Soloviev²,
Anfisa A. Bogdanova², Valentin A. Ushkov²

¹ SUE Moscollector, 14–16, building 1 First Coptel Lane, Moscow, 129090, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article considers the enhancement of physical and mechanical parameters of construction mortars used for recovering and repairing of building structures of communication collectors by using low-temperature nonequilibrium plasma. The study vindicated the expediency of treatment of construction mortar raw materials with LTNP to enhance their physical and mechanical parameters. The effect of plasma modification of raw materials on Portland cement phase composition, granulometric composition of the sand and mortar properties are analysed. The influence of multiplicity of silica sand and mixing water plasma treatment on the construction mortar strength is considered.

Materials and methods. Cement-sand mortars are obtained from Portland cement of the CEM I 32.5N and CEM I 42.5N brands and silica sand with the fineness moduli of $M_f = 0.32$ and $M_f = 0.63$ and a separate fraction of less than 0.16 mm. Setting time and strength of the building mortars are defined according to GOST state standards in effect. Granulometric composition of the cement is explored by means of Analysette-22 particle size microanalyser, while ARL Optim'X spectrometer is used for studying phase composition of the cement stone, silica sand and cement-sand mortars.

Results. It is determined that the plasma treatment of Portland cement reduces the grout normal consistency by 15 to 17 % and decreases its setting time by a factor of 3 to 4. Treatment of mixing water with the nonequilibrium low-temperature plasma removes its hardness, forming additional crystallization nuclei. The plasma-treated mixing water increases the curing rate of cement-sand mortars up to 50 % at the early stages of hardening and up to 30 % on the 28th day of hardening. Using plasma-treated silica sand decreases size of its particles and results in partial transition of the crystalline structure into the amorphous one. This reduces water demand of the sand by 10 to 18 %.

Conclusions. The expedience of plasma treatment of raw materials to enhance the physical and mechanical properties of mortars is vindicated. Owing to the plasma modification of raw materials, quality and process characteristics of construction mortars are improved. The presented method of the plasma treatment of raw materials used to prepare the construction mortars is characterized with high degree of efficiency and convenience of application.

KEYWORDS: nonequilibrium low-temperature plasma, construction mortars, Portland cement, silica sand, mixing water, cycles of processing, strength, setting time

FOR CITATION: Kalyadin A. Yu., Nalbandyan G.V., Soloviev V.G., Bogdanova A.A., Ushkov V.A. Plasma modification of construction mortar components, an efficient method of increasing their performance. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(5):548-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.548-558 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эксплуатационных характеристик строительных изделий и конструкций является одним из направлений разработки новых видов строительных композитов, обладающих высокими механическими и физическими свойствами. Для повышения физико-механических характеристик традиционных строительных материалов широко используют механохимическую активацию портландцемента [1–7] и кварцевого песка [8, 9]. Механическая активация портландцемента приводит не только к росту удельной поверхности цемента, но и к изменению структуры поверхностного слоя частичек цемента, образованию аморфной фазы внутри обработанного вяжущего [1, 4]. Механохимическую активацию цемента осуществляют в аппаратах вихревого слоя [1] в процессе обработки фторирующим реагентом [3] методом высокоэнергетического шарового фрезерования [4], а также за счет применения вибромельниц различной конструкции [5–7]. Механохимическую активацию кварцевого песка проводят в центробежно-планетарной мельнице АТО-2 [8]. Реологические свойства гетерогенных систем при механической активации кварцевого песка рассмотрены в работе [10].

Для улучшения свойств цементно-песчаных растворов используют также электрохимическую, магнитнохимическую и механическую активацию воды затворения [11–15]. В работе [12] детально исследовано структурное состояние цементного

камня в зависимости от числа циклов магнитной активации воды затворения в магнитостатическом поле. При активации воды затворения в установках «Икар» и «Изумруд» изменяется ее окислительно-восстановительный потенциал и возрастает рН воды ~ на 0,8 единицы [13]. При этом скорость релаксации свойств воды в статическом состоянии составляет 0,53–0,96 мВ/мин, а в динамическом — 7,7–11,1 мВ/мин.

Эффективный метод повышения эксплуатационных характеристик строительных изделий и конструкций — применение установок низкотемпературной неравновесной плазмы. Так, например, за счет оплавления низкотемпературной плазмой поверхностного слоя строительных композитов, увеличивается морозостойкость и водонепроницаемость, повышается эстетика бетонных, керамических и силикатных изделий [16–18].

В настоящее время ограничено число публикаций, направленных на определение влияния условий плазменной модификации сырьевых компонентов на физико-механические свойства строительных материалов [19, 20]. Нет и практических рекомендаций по применению установок НТНП для увеличения качества цементно-песчаных растворов, применяемых при проведении ремонтно-восстановительных работ в коммуникационных коллекторах.

Применение установок НТНП — перспективное направление интенсификации производства. Плазменные технологии позволяют создавать строительные композиты с более высокими физико-

механическими свойствами и разрабатывать одно-стадийные замкнутые технологические циклы производства материалов. Также установки используют для модификации порошков, смесей и пульп, обработки воды затворения, обогащения стекловых песков и разлома рыхлых конгломератных материалов по плоскостям спайности минеральных образований, увеличения сцепления вяжущего с фиброй. Плазменная обработка железосодержащих минералов приводит к изменению валентности железа и магнитных характеристик веществ. Низкотемпературную плазму применяют в технологических операциях при получении высокодисперсных металло- и минералосодержащих порошков с размерами частиц сферического строения, в процессах органического синтеза, для механической обработки тугоплавких материалов, при получении пигментов и наполнителей [21, 22]. Промышленное освоение плазменных технологий приведет к коренному техническому перевооружению различных отраслей промышленности России, позволит автоматизировать плазменную обработку строительных материалов и изделий, снизить загрязнение воздушной и водной сред.

С применением установок НТНП разработана технология термического упрочнения гранулированных грунтов и организовано производство гранулированного керамического материала, используемого в качестве засыпок при возведении оснований дорожных одежд автомобильных дорог [23]. Низкотемпературная плазма позволяет модифицировать поверхность полимерных материалов за счет роста поверхностной энергии полимеров, повышения их гидрофильности и адгезии к субстратам [24–26]. Это придает им более высокие эксплуатационные свойства. Плазменные технологии применяют в экспресс-методах определения теплопроводности строительных композитов [27], для получения волокон из тугоплавких силикатсодержащих материалов. Плазменная обработка волокнистых наполнителей повышает адгезионные свойства клеев на основе полихлоропрена [28], а обработка текстильных материалов различной химической природы значительно увеличивает адгезию цементного камня к волокнистому наполнителю при получении фибробетона.

Актуально использование низкотемпературной плазмы при изготовлении высокоструктурированных стеклокристаллических материалов, содержащих золошлаковое сырье. Обработка НТНП тонкоизмельченных кислотоупорных горных пород (диабазовая или кварцевая мука) повышает прочность эпоксидно-каучуковых композитов [29, 30]. Увеличение прочности вторичных термопластичных полимеров наблюдается и при обработке НТНП пигментов на основе оксидов железа [31]. Таким

образом, применение плазменных технологий при изготовлении строительных изделий различного функционального назначения позволит повысить их эксплуатационные показатели и использовать в производстве строительных композитов отходы техногенного типа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При изготовлении цементно-песчаных растворов применяли цемент типа ЦЕМ I 32,5Н, ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2016; кварцевый песок II класса с модулем крупности $M_k = 0,63$, $M_k = 0,32$ по ГОСТ 8736-2014 и его отдельную фракцию размером менее 0,16 мм. Содержание различных фаз по объему в составе цементного камня, кварцевого песка и цементно-песчаных растворов определяли с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL Optim'X, а зерновой состав цемента — лазерным микроанализатором размера частиц Analysette-22 в соответствии с ISO 13320-1:2009. Методом капиллярной конденсации азота, используя для этих целей анализатор NOVA 2200e, определяли величину суммарной поверхности зерен песка и объем пор мелкодисперсного наполнителя. Способом Single Point BET SA измеряли площадь поверхности кварцевого песка, а методом Баррета-Джойнера-Халенды рассчитывали распределение пор. С помощью Раман-спектрометра определяли спектрограммы комбинированного рассеяния света кварцевого песка. Вода, применяемая для затворения цементно-песчаных растворов, соответствовала требованиям ГОСТ 23732-2011. Предел прочности при сжатии цементно-песчаных растворов измеряли на гидравлическом прессе Instron-3382 и разрывной машине WDW-100E по ГОСТ 310.4-81, а сроки схватывания — по ГОСТ 310.3-76.

Обработку вяжущего, кварцевого песка и воды производили в лабораторной плазменной установке, которая описана в работе [19]. В указанной установке НТНП формируется источником переменного тока с напряжением до 8000 В и частотой до 40 кГц. Между электродами возникает область НТНП со значением параметра $E/N = 15 \times 10^{-16}$ В · см². Портландцемент и кварцевый песок обрабатывали в проточном режиме и в барьерном разряде.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Повышение эксплуатационных характеристик цементно-песчаных растворов путем модификации сырьевых компонентов НТНП — инновационный метод улучшения свойств строительных растворов. Установлено, что минералогический состав портландцемента после обработки НТНП практически

не изменяется, но снижается средний и максимальный размер частиц, возрастают содержание частиц с размером менее 2 мкм и удельная поверхность цемента (табл. 1). Применение цемента, модифицированного НТНП, снижает В/Ц-отношение при получении нормальной густоты цементного теста с 0,3 до 0,26. Обработка портландцемента НТНП приводит к изменению сроков его схватывания, предположительно, за счет разрушения кристаллогидратного слоя и частичного удаления химически связанной воды с поверхностного слоя зерен цемента, так сроки начала и окончания схватывания цемента снижаются с 60 и 180 мин до 15 и 60 мин, соответственно.

Кварцевый песок с $M_k = 0,63$ и фракцию размером менее 0,16 мм обрабатывали НТНП в проточном непрерывном режиме методом барьерного разряда. Выявлено, что обработка кварцевого песка НТНП привела к сокращению удельной поверхности его зерен на 10,6–20,3 % и площади поверхности пор на 8,4–14,1 % (табл. 2). При этом в мелком заполнителе прослеживается значительное изменение удельной поверхности пор радиусом 20–35 А. Существенное уменьшение площади поверхности пор песка и его удельной поверхности наблюдается с повышением размера частиц SiO_2 . Результаты проведенных исследований показывают, что

Табл. 1. Фазовый и гранулометрический состав портландцемента

Table 1. Phase and granulometric composition of Portland cement

Показатели / Indicators	Исходный / Basic	После обработки НТНП / After plasma treatment
Гранулометрический состав / Granulometric composition:		
средний размер частиц d_{50} , мкм / average particle size d_{50} , μm	17,475	17,722
максимальный размер частиц d_{95} , мкм / maximum particle size d_{95} , μm	58,601	56,437
содержание частиц размером менее 2 мкм, % / content of particles smaller than 2 μm , %	9,54	9,95
Удельная поверхность, cm^2/g / Specific surface area, cm^2/g	3540	3680
Минералогический состав, % мас. / Mineralogical composition, mass %:		
Ca_3SiO_5 (C3S)	55,2	55,7
Ca_2SiO_4 (β -C2S)	19,8	19,5
Ca_2SiO_3 (C3A)	5,0	4,9
$Ca_2(Al_{0,5}Fe_{0,5})_2O_5$ (C4AF)	15,8	15,6
полуводный гипс / hemihydrate plaster	3,3	3,2
гашеная известь / hydrated lime	0,9	1,1

Табл. 2. Показатели кварцевого песка при различных типах его модификации

Table 2. Silica sand parameters for different treatment types

Характеристика размеров песка / Sand size indicator	Вид обработки НТНП / Type of plasma treat- ment	Площадь поверхности (способ М-р BET), cm^2/g / Surface area (multipoint BET technique), cm^2/g	Коэффициент корреляции / Correlation factor, R	Характеристика пор (способ БДХ) / Pore parameters (BJH technique)		
				Площадь поверхности, cm^2/g / Surface area, cm^2/g	Объем пор, mg^3/g / Pore volume, mg^3/g	Радиус пор / Pore radius Dv(r), А
$M_k = 0,63$ / $M_f = 0.63$	—	229,8	0,997	86,8	0,003	20,345
	Барьерный разряд / Barrier discharge	205,5	0,995	79,5	0,002	20,470
< 0,16 мм / < 0.16 mm	—	461,9	0,992	199,5	0,004	20,470
	Проточный режим / Flowing mode	368,2	0,991	165,4	0,004	20,417

наблюдаемый эффект связан с оплавлением поверхности частиц песка при их взаимодействии со стримером. Анализ структуры кварцевого песка на Раман-спектрометре показал также переход его кристаллической структуры в аморфную. Результаты исследований подтверждают и снижение на 10–18 % водопотребности модифицированного НТНП кварцевого песка.

Рентгенофазовый анализ кварцевого песка после его обработки НТНП показал, что кратность плазменной модификации наполнителя не влияет на его фазовый состав (табл. 3). Увеличение кратности обработки кварцевого песка НТНП не привело к существенному изменению минералогического состава затвердевшего цементно-песчаного раствора (табл. 4).

Изменение микроструктуры поверхностного слоя кварцевого песка при его обработке НТНП приводит к увеличению физико-механических свойств цементно-песчаных растворов. Прочность

на сжатие растворных образцов-балочек повышается на 20,4 % при однократной обработке НТНП кварцевого песка (необработанный образец — 23,5 МПа, образец с модифицированным кварцевым песком — 28,3 МПа). При двух- и трехкратной обработке SiO_2 НТНП прочность растворных образцов-балочек на 28 сутки при нормальных условиях твердения возрастает на 13,3 и 17 % до 33 и 38 МПа, соответственно (рис. 1).

Под влиянием внешних физических факторов (магнитные, электромагнитные и др. поля) изменяются свойства воды. Это оказывает значительное влияние на скорость химических реакций при гидратации портландцемента. Под воздействием внешнего поля происходит разрыв водородных связей в химическом строении воды и образование свободных ионов H^+ и OH^- . Свободные молекулы воды и ионы, по сравнению с ассоциатами из двух, трех и более молекул воды, более подвижны, имеют намного меньшие размеры и легче проникают к актив-

Табл. 3. Фазовый состав исследованных образцов кварцевого песка

Table 3. Phase composition of studied silica sand samples

Кратность обработки НТНП / Plasma-treatment multiplicity	Содержание, % мас. / Content, mass %			
	Кварц / Silica (SiO_2)	Корунд / Corundum (Al_2O_3)	Полевые шпаты / Feldspars	
			Альбит / Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)	Микроклин / Microcline (KAlSi_3O_8)
—	94,9	1,7	1,3	2,1
1	94,8	1,8	1,4	2,0
2	95,0	1,7	1,1	2,2
3	94,5	1,9	1,5	2,1

Табл. 4. Фазовый состав цементно-песчаных растворов после обработки кварцевого песка низкотемпературной плазмой

Table 4. Phase composition of cement-sand mortars after low-temperature plasma treatment of silica sand

Фазовый состав / Phase composition	Содержание, % мас. при кратности обработки кварцевого песка / Content, mass %, for silica sand treatment multiplicity			
	—	1	2	3
Кварц / Silica	76,2	76,0	76,1	76,0
Полевые шпаты / Feldspars	2,7	2,8	2,6	2,7
Al_2O_3	0,9	1,0	1,2	1,0
C3S	3,3	3,1	3,2	3,0
B-C2S	2,9	2,7	2,6	2,5
C4AF	1,7	1,7	1,6	1,6
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	2,4	2,9	2,9	3,4
Этtringит / Ettringite	1,2	1,1	1,2	1,1
CaCO_3	0,7	0,7	0,6	0,7
Аморфная фаза / Amorphous phase	8,0	8,0	8,0	8,0

Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии строительных растворов от кратности обработки НТНП кварцевого песка: 1 — трехкратное; 2 — двухкратное; 3 — однократное; 4 — необработанный кварцевый песок

Fig. 1. Dependence curves of ultimate compression strength of beam samples made of mortars on silica sand plasma-treatment multiplicity: 1 — 3-fold; 2 — 2-fold; 3 — 1-fold; 4 — untreated silica sand

ным центрам в решетке твердого тела, вызывая его гидратацию. Следовательно, актуальным является изучение механизма твердения минеральных вяжущих веществ и свойств строительных композитов, изготовленных с применением плазменной модификации воды затворения.

Обработка НТНП воды затворения приводит к понижению концентрации растворимых солей кальция и магния, вследствие чего происходит ускорение процесса твердения портландцемента и повышение набора прочности цементно-песчаных растворов с первых по пятью сутки при нормальных условиях твердения (рис. 2).

Реакционный эффект использования обработанной НТНП воды затворения повышается с увеличением сроков ее хранения (до 28 сут). Испытания образцов-балочек через 28 сут нормального твердения показали, что прочность при сжатии цементно-песчаных растворов выше при применении модифицированной воды затворения, чем при использовании неактивированной (контрольный образец — 18,2 МПа, опытный образец — 21,2–

23,4 МПа) воды (рис. 2). При однократной обработке воды затворения прочность на сжатие строительных растворов через 28 сут твердения, по сравнению с контрольным образцом (с необработанной водой), повышается на 11,9 % (с 18,5 до 21 МПа). При применении воды затворения, прошедшей двух- и трехкратную обработку НТНП, прочность при сжатии образцов-балочек дополнительно возрастает на 4,5–6 %. Эти испытания демонстрируют низкую эффективность многократной обработки НТНП воды затворения. Дальнейшие испытания показали, что обработка воды затворения более трех раз не приводит к дополнительному эффекту.

Применение смеси немодифицированной и обработанной НТНП воды затворения является оправданным действием с экономической точки зрения. Установлено, что при их соотношении, равном 1:1, формируется строительный раствор с максимальным показателем прочности (рис. 3). При использовании смеси модифицированного и контрольного кварцевого песка, прочность строительных растворов линейно снижается с уменьшением содержания

Рис. 2. Зависимость прочности при сжатии растворов образцов-балочек от сроков хранения модифицированной воды затворения: 1 — 28 сут; 2 — 14 сут; 3 — 7 сут; 4 — 1 сут; 5 — необработанная вода

Fig. 2. Dependence of modified mixing water storage time on ultimate compression strength of beam samples: 1 — 28 days; 2 — 14 days; 3 — 7 days; 4 — 1 days; 5 — untreated water

Рис. 3. Зависимость прочности при сжатии растворов образцов-балочек от количества обработанных в НТП: 1 — воды; 2 — кварцевого песка

Рис. 3. Dependence of compression strength of beam samples on content of plasma-treated raw materials: 1 — water; 2 — silica sand

модифицированного НТП заполнителя (рис. 3). Обнаружен синергетический эффект увеличения прочности при сжатии ремонтных растворов при совместном применении однократно модифицированного песка и воды. Это подтверждает различные механизмы повышения прочности цементно-песча-

ных растворов при обработке НТП воды затворения и заполнителя.

Обработка сырьевых компонентов НТП при ремонте строительных конструкций характеризуется низкой себестоимостью, сравнительной простотой и высоким уровнем эффективности. Обработка

сырьевых компонентов НТНП улучшает качество продукции, уменьшая ее стоимость, и может быть использована на действующих предприятиях строительной индустрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования различных способов обработки сырьевых компонентов цементно-песчаных растворов и мелкозернистых бетонов для увеличения эксплуатационных характеристик строительных изделий, выявлено, что установки НТНП — наиболее эффективное и перспективное направление модификации исходного сырья. Модификация цемента НТНП снижает нормальную плотность цементного теста на 15–17 % и уменьшает

сроки его схватывания, повышает величину прочности при сжатии цементно-песчаных образцов на 15–20 %. При плазменной обработке мелкодисперсного заполнителя происходит оплавление его поверхности и уменьшается на 10–18 % его водопотребность. Следствием обработки НТНП кварцевого песка является переход кристаллической структуры мелкого заполнителя в аморфную. Применение воды затворения, обработанной НТНП, увеличивает до 50 % динамику набора прочности и до 30 % значения прочности строительных растворов в возрасте 28 сут. Представленный метод плазменной обработки сырьевых компонентов, используемых для приготовления строительных растворов, характеризуется высокой степенью эффективности и удобством в применении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Structural parameters and properties of fine-grained concrete on Portland cement, activated with plasticizers in vortex layer apparatuses // ZKG International. 2018. Vol. 71. Issue 5. Pp. 28–35.
2. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Effect of mechanochemical activation of binder on properties of fine-grained concrete // Magazine of Civil Engineering. 2015. Vol. 54. Issue 2. P. 63. DOI: 10.5862/MCE.54.7
3. Demyanova L.P., Zaeva A.S., Buinovskiy A.S. Influence of activation of quartz grain surface on efficiency of the process of processing the quartz sand grains with fluoride technology // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2013. Vol. 47. Issue 6. Pp. 766–771. DOI: 10.1134/S0040579513040209
4. Mejdoub Roukaya, Hammi Halim, Khitouni Mohamed, Josep Sunol Joan, M'nif Adel. The effect of prolonged mechanical activation duration on the reactivity of portland cement: Effect of particle size and crystallinity changes // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 152. Pp. 1041–1050. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.008
5. Sobolev Konstantin, Lin Zhibin, Cao Yizheng, Sun Hongfang, Flores-Vivian Ismael, Rushing Todd et al. The influence of mechanical activation by vibromilling on the early-age hydration and strength development of cement // Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 71. Pp. 53–62. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.04.010
6. Mucsi Gabor, Racz Adam, Madai Viktor. Mechanical activation of cement in stirred media mill // Powder Technology. 2013. Vol. 235. Pp. 163–172. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.10.005
7. Sekulic Z., Petrov M., Zivanovic D. Mechanical activation of various cements // International Journal of Mineral Processing. 2004. Vol. 74. Pp. S355–S363. DOI: 10.1016/j.minpro.2004.07.022
8. Kosobudskii I.D., Gvozdev G.A., Fedorov F.S., Nikitina L.V., Zhimalov A.B., Bondareva L.N. et al. Mechanochemical activation of sand in the Ago-2 centrifugal-planetary mill // Glass and Ceramics. 2015. Vol. 72. Issue 5–6. Pp. 199–202. DOI: 10.1007/s10717-015-9755-x
9. Abdullah A., Alhozaimey A. Effect of various activation methods on the reactivity of ground dune sand as partial cement replacement // 2013 IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC). 2013. DOI: 10.1109/beiac.2013.6560134
10. Лопанов А.Н., Фанина Е.А., Гузеева О.Н. Регулирование электрических и реологических свойств гетерогенных систем на основе кварцевого песка и графита механической активацией кварцевого песка // Вестник МГСУ. 2016. № 8. С. 78–87. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.8.78-87
11. Fedosov S.V., Akulova M.V., Vzinovyeva E. Features of mechanical activation of the distilled water by different nozzles of the rotor agitator // News of higher educational institutions. Ser. : Textile technology. 2016. No. 1. Pp. 153–157.
12. Gaevskaya S.A., Abzaev Yu.A., Safronov V.N., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Ermilova T.A. Effect of mixing water magnetic activation cycle on cement stone structure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 71. P. 012013. DOI: 10.1088/1757-899x/71/1/012013
13. Ермолаев Ю.М., Родионов Б.Н., Родионов Р.Б., Стехин А.А., Чистов Ю.Д. Повышение прочности пенобетона при использовании структурированной воды // Технология бетонов. 2006. № 2. С. 54–55.

14. Родионов Б.И., Родионова С.В., Стехин А.А., Яковлева Г.В. О релаксации свойств активированной воды и применении ее в строительстве // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2007. № 9 (104). С. 24–25.
15. Баженов Ю.М., Федосов С.В., Ерофеев В.Т., Матвиевский А.А., Митина Е.А., Емельянов Д.В. и др. Цементные композиты на основе магнитно- и электрохимически активированной воды затворения. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2011. 128 с.
16. Федосов С.В., Акулова М.В. Плазменная металлization бетонов. М. : Изд-во АСВ, 2003. 122 с.
17. Науменко Н.Н., Федосов С.В., Акулова М.В., Щепочкина Ю.А., Подлозный Э.Д. Плазменное оплавление строительных композитов. М. : Изд-во АСВ ; Иваново : ИГАСУ, 2009. 228 с.
18. Федосов С.В., Щепочкина Ю.А., Акулова М.В., Науменко Н.Н., Анисимова Н.К. Современные методы отделки стеновых строительных материалов. Иваново : ИГАСУ, 2012. 212 с.
19. Бруйко М.Г., Кравцова Д.В., Юргенко В.В., Соловьев В.Г., Ушков В.А. Влияние обработки сырьевых материалов низкотемпературной неравновесной плазмой на свойства строительных растворов // Строительные материалы. 2014. № 12. С. 68–71.
20. Bruyako M.G., Glukhoedov V.A., Kravtsova D.V., Smirnov V.A., Ushkov V.A. Plasma processing in industry of building materials // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. Pp. 730–734. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.730.
21. Волокотин Г.Г., Скрипникова Н.К., Шляев А.М., Петроченко В.В. Плазменные технологии в строительстве. Томск : Изд-во ТГАСУ, 1997. 290 с.
22. Петров В.А., Гибадуллин М.Р., Шаехов М.Ф., Косточко В.В., Абдуллин И.Ш. Высоко-частотная низкотемпературная плазменная интенсификация физико-химических процессов при переработке целлюлозы // Химия растительного сырья. 2010. № 1. С. 41–48.
23. Ефименко В.Н. Плазменная обработка гранулированного грунта при производстве керамического материала для строительства основания дорожных одежд автомобильных дорог : автореф. дис. ... д-ра тех. наук. Томск, 1994. 37 с.
24. Рыбкин В.В. Низкотемпературная плазма как инструмент модификации поверхности полимерных материалов // Химия. 2000. Т. 6. № 3. С. 58–63.
25. Пророкова Н.П., Кумеева Т.Ю., Кузьмина С.М., Холодков И.В. Модифицирование поверхностно-барьерным разрядом полиэфирных волокнистых материалов в целях улучшения их гидрофильности // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 1. С. 119–127.
26. Джбааи К.А., Ларина Ю.Н., Титов В.А., Шикова Т.Г. Процессы модификации и деструкции арамидной пленки в неравновесной плазме кислорода и аргона // Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 6. С. 58–63.
27. Шляев А.М., Волокотин Г.Г., Лысак И.А. Экспресс метод определения теплопроводности строительных материалов с помощью высококонцентрированного потока плазмы // Строительные материалы. 2003. № 11. С. 17–18.
28. Каблов В.Ф., Кейбал Н.А., Руденко К.Ю., Мотченко А.О., Харламов Е.В., Кумскова В.А. и др. Применение плазменной обработки для модификации волокнистых наполнителей с целью повышения адгезионных свойств клеевых составов на основе полихлоропрена // Известия ВолгГТУ. Сер. : Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов. 2015. № 4 (159). С. 87–90.
29. Пат. РФ № 2488610. Слабогорючая химически стойкая полимерная композиция / Ушков В.А., Баженов Ю.М., Сенин Н.И., Абрамов В.В., Бруйко М.Г., Орлова А.М. и др. ; патентообл. ФГБОУ ВПО «МГСУ». № 2012114186/05, заявл. 11.04.2012 ; опубл. 27.07.2013. Бюл. № 21.
30. Пат. РФ № 2495894. Слабогорючая химически стойкая полимерная композиция / Ушков В.А., Абрамов В.В., Бруйко М.Г., Григорьева Л.С., Славин А.М. ; патентообл. ФГБОУ ВПО «МГСУ». № 2012130485/04, заявл. 18.07.2012 ; опубл. 20.10.2013. Бюл. № 29.
31. Ушков В.А., Орлова А.М., Славин А.М., Манухов Г.О. Вторичные полиолефины, содержащие модифицированный железоксидный пигмент // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 3. С. 17–18.

Поступила в редакцию 14 января 2019 г.

Принята в доработанном виде 12 марта 2019 г.

Одобрена для публикации 28 апреля 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: **Калядин Антон Юрьевич** — начальник производственного отдела ГУП «Москоллектор», 129090, г. Москва, 1-й Коптевский пер., д. 14–16, стр. 4, kalyadin-au@moscollector.ru;

Налбандян Григор Виленич — аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, tvvib@mgsu.ru, grigor33@mail.ru;

Соловьев Вадим Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, tvvib@mgsu.ru, s_vadim_g@mail.ru;

Богданова Анфиса Анатольевна — бакалавр, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, tvvib@mgsu.ru, anfisa.1997@mail.ru;

Ушков Валентин Анатольевич — кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Современные композиционные строительные материалы», **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ushkovva@mgsu.ru, va.ushkov@yandex.ru.

REFERENCES

1. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Structural parameters and properties of fine-grained concrete on Portland cement, activated with plasticizers in vortex layer apparatuses. *ZKG International*. 2018; 71(5):28-35.
2. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Effect of mechanochemical activation of binder on properties of fine-grained concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 54(2):63-69. DOI: 10.5862/MCE.54.7
3. Demyanova L.P., Zueva A.S., Buinovskiy A.S. Influence of activation of quartz grain surface on efficiency of the process of processing the quartz sand grains with fluoride technology. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2013; 47(6):766-771. DOI: 10.1134/S0040579513040209
4. Mejdoub Roukaya, Hammi Halim, Khitouni Mohamed, Josep Sunol Joan, M'nif Adel. The effect of prolonged mechanical activation duration on the reactivity of portland cement: Effect of particle size and crystallinity changes. *Construction and Building Materials*. 2017; 152:1041-1050. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.008
5. Sobolev Konstantin, Lin Zhibin, Cao Yizheng, Sun Hongfang, Flores-Vivian Ismael, Rushing Todd et al. The influence of mechanical activation by vibro-milling on the early-age hydration and strength development of cement. *Cement and Concrete Composites*. 2016; 71:53-62. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.04.010
6. Mucsi Gabor, Racz Adam, Madai Viktor. Mechanical activation of cement in stirred media mill. *Powder Technology*. 2013; 235:163-172. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.10.005
7. Sekulic Z., Petrov M., Zivanovic D. Mechanical activation of various cements. *Journal International Journal of Mineral Processing*. 2004; 74:S355-S363. DOI: 10.1016/j.minpro.2004.07.022
8. Kosobudskii I.D., Gvozdev G.A., Fedorov F.S., Nikitina L.V., Zhimalov A.B., Bondareva L.N. et al. Mechanochemical activation of sand in the Ago-2 centrifugal-planetary mill. *Glass and Ceramics*. 2015; 72(5-6):199-202. DOI: 10.1007/s10717-015-9755-x
9. Abdullah A., Alhozaimy A. Effect of various activation methods on the reactivity of ground dune sand as partial cement replacement. *2013 IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BE-IAC)*. 2013. DOI: 10.1109/beiac.2013.6560134
10. Lopanov A.N., Fanina E.A., Guzeeva O.N. Regulation of electrical and rheological properties of heterogeneous systems on the basis of quartz sand and graphite by mechanical activation of quartz sand. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 8:78-87. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.8.78-87 (rus.).
11. Fedosov S.V., Akulova M.V., Vzinovyeva E. Features of mechanical activation of the distilled water by different nozzles of the rotor agitator. *News of higher educational institutions. Ser. : Textile technology*. 2016; 1:153-157.
12. Gaevskaya S.A., Abzaev Yu.A., Safonov V.N., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Ermilova T.A. Effect of mixing water magnetic activation cycle on cement stone structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015; 71:012013. DOI: 10.1088/1757-899x/71/1/012013
13. Ermolaev Yu.M., Radionov B.N., Radionov R.B., Stekhin A.A., Chistov Yu.D. Increase of durability of foam concrete when using the structured water. *Concrete technology*. 2006; 2:54-55. (rus.).
14. Rodionov B.I., Rodionova S.V., Stekhin A.A., Yakovleva G.V. About the relaxation of the properties of activated water and its possible use in construction. *Construction materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2007; 9(104):24-25. (rus.).
15. Bazhenov Yu.M., Fedosov S.V., Erofeev V.T., Matnievskii A.A., Mitina E.A., Emelyanov D.V. et al. *Cement composites on the basis of the magnetic and electrochemical activated water*. Saransk, Publisher Mordovia University, 2011; 128. (rus.).
16. Fedosov S.V., Akulova M.V. *Plasma metalization of concrete*. Moscow, ASV Publ., 2003; 122. (rus.).
17. Naumenko N.N., Fedosov S.V., Akulova M.V., Shchepochkina Yu.A., Podlozny E.D. *Plasma fusion of building composites*. Moscow, ASV Publ.; Ivanovo, Ivanovo State Polytechnic University Publ., 2009; 228. (rus.).
18. Fedosov S.V., Shchepochkina Yu.A., Akulova M.V., Naumenko N.N., Anisimova N.K. *Modern methods of finishing of wall construction materials*. Iva-

novo, Ivanovo State Polytechnic University Publ., 2012; 212. (rus.).

19. Bruyako M.G., Kravtsova D.V., Yurgenko V.V., Soloviev V.G., Ushkov V.A. The influence of processing of raw materials with low-temperature nonequilibrium plasma on the properties of mortar. *Construction materials*. 2014; 12:68-71. (rus.).

20. Bruyako M.G., Glukhoedov V.A., Kravtsova D.V., Smirnov V.A., Ushkov V.A. Plasma processing in industry of building materials. *Advanced Materials Research*. 2014; 1040:730-734. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.730 (rus.).

21. Volokotin G.G., Scripnikova N.K., Shilyaev A.M., Petrochenko V.V. *Plasma technology in construction*. Tomsk, Tomsk University of architecture and construction Publ., 1997; 290. (rus.).

22. Petrov V.A., Gibadullin M.R., Shayakhov M.F., Kostochko V.V., Abdullin I.Sh. High-frequency low-temperature plasma intensification of physical and chemical processes in the processing of cellulose. *Chemistry of plant materials*. 2010; 1:41-48. (rus.).

23. Efimenko V.N. *Plasma treatment of granulated clay soil in the production of ceramic material for the construction of the foundations of road pavements: author's abstract of doctoral dissertation of technical science*. Tomsk, 1994; 37. (rus.).

24. Rybkin V.V. Low-temperature plasma as an instrument for surface modification of polymer materials. *Chemistry*. 2000; 6(3):146. (rus.).

25. Prorokova N.P., Kumeeva T.Yu., Kuzmina S.M., Kholodnov I.V., Abdullin I.Sh. Modifying the surface-barrier discharge of polyester fibrous materials in order to improve their hydrophilicity. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2016; 89(1):119-127. (rus.).

26. Jbaai K.A., Shikova T.G., Titov V.A., Larina Yu.N. Processes of modification and destruction of aramid film in a nonequilibrium oxygen and argon plasma. *Chemistry and chemical technology*. 2014; 57(6):58-63. (rus.).

27. Shilleev A.M., Volokitin G.G., Lysak I.A. Express method for determining the thermal conductivity of building materials using a highly concentrated plasma flow. *Construction materials*. 2004; 3:12-13. (rus.).

28. Kablov V.F., Keibal N.A., Rudenko K.Y., Motchenko A.O., Kharlamov E.V., Kumsikova V.A. et al. Application of plasma treatment for modification fibrous fillers in order to improve the adhesive properties off adhesive composition based polychloroprene. *Izvestia Volgograd State Technical University. Ser. : Chemistry and technology of organoelement monomers and polymeric materials*. 2015; 4(159):87-90. (rus.).

29. Patent RF No. 2488610. Weakly combustible chemically resistant polymer composition / Ushkov V.A., Bazhenov Yu.M., Senin N.I., Abramov V.V., Bruyako M.G. Orlova A.M. et al. patent holder of MGSU. No. 2012114186/05, statement 11.04.2012. 11.04.2012. Publ. 27.07.2013. Bul. No. 21.

30. Patent RF No. 2495894. Weakly combustible chemically resistant polymer composition / Ushkov V.A., Abramov V.V., Bruyako M.G., Grigorieva L.S., Slavin A.M. patent holder of MGSU. No. 2012130485/04, statement 18.07.2012. Publ. 20.10.2013. Bul. No. 29.

31. Ushkov V.A., Orlova A.M., Slavin A.M., Manukhov G.O. Secondary polyolefins containing a modified iron oxide pigment. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 3:17-18. (rus.).

Received January 14, 2019

Adopted in a modified form March 12, 2019

Approved for publication April 28, 2019

BIONOTES: Anton Y. Kalyadin, Head of production, Department Moskolektor, 14–16, building 4, 1st Koptelsky lane, Moscow, 129090, Russian Federation, kalyadin-au@moscollector.ru;

Grigor V. Nalbandyan, Postgraduate of Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, tvvib@mgsu.ru, grigor33@mail.ru;

Vadim G. Soloviev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, tvvib@mgsu.ru, s_vadim_g@mail.ru;

Anfisa A. Bogdanova, Bachelor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, tvvib@mgsu.ru, anfisa.1997@mail.ru.

Valentin A. Ushkov, Candidate of Technical Sciences, Head of research laboratory “Modern composite building materials”, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, ushkovva@mgsu.ru, va.ushkov@yandex.ru;