УДК 691.542

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-139-152

О.В. ДЕМЬЯНЕНКО, А.А. КУЛИКОВА, Н.О. КОПАНИЦА, Томский государственный архитектурно-строительный университет

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА

Современные научные разработки в строительном материаловедении в области рецептуры и технологии производства мелкозернистого бетона направлены на формирование в них структуры и свойств, обеспечивающих необходимые эксплуатационные характеристики. Анализ литературных и экспериментальных данных по способам воздействия на бетон позволил предположить, что достичь требуемых показателей качества бетонов возможно изменением компонентного состава бетонной смеси, активацией заполнителя и воды затворения, введением модифицирующих добавок полифункционального действия, различными технологическими приемами и т. д. В работе представлены результаты исследований, связанных с разработкой эффективной полифункциональной добавки (ПД), состоящей из отходов производства мрамора-микрокальцита (МСа), нанодиоксида кремния (SiO₂), микрокремнезема (МК) и термомодифицированного торфа при 600 °C (МТ-600). Изучено ее влияние на свойства цементного камня и бетона. Показано, что введение полифункциональной добавки в количестве 5 %, при снижении расхода цемента, позволяет увеличить прочность на сжатие цементного камня до 69 %. С помощью физико-химических методов анализа определен состав новообразований модифицированного цементного камня.

Ключевые слова: микрокальцит; отходы производства; микрокремнезем; нанодиоксид кремния; МТ-600; цементные композиции.

Для цитирования: Демьяненко О.В., Куликова А.А., Копаница Н.О. Оценка влияния комплексной полифункциональной добавки на эксплуатационные характеристики цементного камня и бетона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 5. С. 139–152. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-139-152

O.V. DEM'YANENKO, A.A. KULIKOVA, N.O. KOPANITSA, Tomsk State University of Architecture and Building

THE EFFECT OF COMPLEX MULTI-PURPOSE ADDITIVE ON OPERATING PROPERTIES OF HYDRATED CEMENT AND CONCRETE

The research developments in materials science in the construction field concerning the formulation and production process of fine-grain concrete are aimed at the formation of structure and properties that provide the appropriate performance characteristics. The literature review and experimental data on the concrete treatment made show that the required quality of concrete can be achieved by changing the concrete mixture composition, activation of aggregate and mixing water, introduction of multi-purpose modifying additives, different approaches, etc. The paper presents the development of the effective multi-purpose additive consisting of such industrial wastes as marble-microcalcite, nano silicon dioxide, microsilica, and peat thermally modified at 600 °C. The influence of this additive on hydrated cement and concrete properties is studied herein. It is shown that the introduction of the multi-purpose additive in an amount of 5 % with a decrease in the cement consumption, improves the compressive

strength of hydrated cement stone up to 69 %. The chemical composition of new formations of modified hydrated cement is determined by the physicochemical analysis.

Keywords: microcalcite; industrial waste; microsilica; nano silicon dioxide; cement composition.

For citation: Dem'yanenko O.V., Kulikova A.A., Kopanitsa N.O. Otsenka vliyaniya kompleksnoi polifunktsional'noi dobavki na ekspluatatsionnye kharakteristiki tsementnogo kamnya i betona [The effect of complex multi-purpose additive on operating properties of hydrated cement and concrete]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 5. Pp. 139–152.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-139-152

Ввеление

Для разработки эффективных полифункциональных добавок необходимо подобрать их вещественный состав так, чтобы каждый из компонентов улучшал или дополнял свойства предыдущего. Для создания материала с улучшенными или новыми свойствами и функциями в работе применялся подход «снизу-вверх», или «формирование молекулярного ансамбля», понятие, предложенное Эриком Дрекслером и другими авторами в работе [1]. Предполагается, что композиционные материалы выстраиваются из компонентов различного состава и дисперсности путем сборки или самосборки, начиная с наноразмеров.

На рис. 1 представлена модель формирования вещественного состава комплексной модифицирующей добавки, в соответствии с научной гипотезой, в табл. 1 представлены характеристики, приобретаемые цементным камнем с появлением каждого компонента добавки. Ранее проведенные исследования [2, 3–8, 11] позволяют предполагать, что, используя в полифункциональной добавке предложенные вещества в комплексе с нано-SiO₂, можно добиться синергетического эффекта влияния на свойства цементного камня (ЦК) за счет их физико-химического взаимодействия. Совместимость комплексной добавки с цементным камнем зависит от совместимости каждого компонента с вяжущим по отдельности.

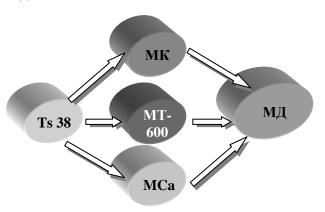


Рис. 1. Модель формирования вещественного состава комплексной полифункциональной добавки для мелкозернистого бетона

Таблица 1 Формирование характеристик цементного камня с различными компонентами добавки

Компонент добавки					
нано-	микро-			Характеристики цементного камня (ЦК)	
SiO ₂	MT-600	MCa	МК		
+				Повышение прочности ЦК	
+			+	Повышение прочности ЦК, плотная упаковка структуры ЦК, повышение морозостойкости	
+	+			Снижение водопотребности за счет гидрофобности добавки, повышение водонепроницаемости, увеличение адгезии к основанию	
+		+		Повышение прочности ЦК, снижение расхода цемента, формирование дополнительного объема продуктов гидратации ЦК при взаимодействии с SiO_2	
+	+	+	+	Повышение прочности ЦК, водонепроницаемости морозостойкости, снижение расхода цемента без снижения физико-механических характеристик Ц формирование дополнительного объема продукто гидратации ЦК при взаимодействии с SiO ₂ , обесп чение плотной упаковки в структуре ЦК	

На первом этапе исследовалось влияние наноразмерных частиц SiO₂ на свойства цементного камня. При введении наночастиц предположительно будет повышаться прочность цементного камня за счет активации процессов формирования структуры цементного камня на наномасштабном уровне. Микроразмерные компоненты с нано-SiO₂, в зависимости от условий происхождения, улучшают свойства ЦК (морозостойкость, прочность, адгезию, водонепроницаемость и др). Термомодифицированная органоминеральная добавка МТ-600 с нано-SiO₂ предположительно будет повышать адгезию к основанию, водонепроницаемость, снижать водопотребность за счет гидрофобности добавки. Добавка микрокальцита с нано-SiO₂ позволит повысить прочность ЦК при снижении расхода цемента за счет формирования дополнительного объема продуктов гидратации ЦК при взаимодействии с CaO и SiO₂ Добавка микрокремнезема, являясь веществом с высокой пуццолановой активностью, оказывает влияние на свойства как цементного теста, так и цементного камня. При введении МК с нано-SiO₂ в вяжущее увеличится прочность и морозостойкость ЦК за счет уплотнения структуры ЦК и взаимодействия частиц добавки с продуктами гидратации цементного вяжущего. Усиливающий эффект взаимодействия двух и более компонентов добавки характеризуется тем, что совместное действие этих факторов существенно превосходит полученные характеристики каждого компонента по отдельности. При разработке полифункциональной добавки все компоненты соединяются для достижения синергетического эффекта. Сферическая форма частиц добавки приводит к улучшению когезионных свойств цементного теста. Различные размеры частиц комплексной добавки позволяют заполнить объем между грубодисперсными частицами цемента. Высокая удельная поверхность компонентов добавки стимулирует образование многочисленных коагуляционных контактов, сокращая объем свободной воды.

Цель исследования: разработать эффективную полифункциональную добавку для цементного камня и бетона и изучить ее влияние на физикомеханические и физико-химические свойства цементного камня.

Материалы и методы

Для исследований были использованы следующие материалы:

- а) вяжущее: портландцемент ЦЕМ І 42,5Н Топкинского цементного завода (ГОСТ 31108–2016). Удельная поверхность $0.3 \text{ m}^2/\text{г}$;
 - б) вода затворения (ГОСТ 23732-2011);
- в) компоненты полифункциональной добавки: микрокальцит, отход производства при переработке мрамора (мраморная мука), тонкодисперсный порошок, соответствующий ГОСТ Р 56775–2015. Мрамор добывается на Ново-Ивановском карьере вблизи г. Полевского, разрабатываемый ООО «Эверест». Микрокальцит является отходом производства при переработке мрамора. Удельная поверхность 2 м 2 /г; наномодификатор диоксид кремния Тs38. Наноразмерный диоксид кремния (Таркосил) получен способом испарения вещества под действием электронного пучка, создаваемого электронным ускорителем, получил название Тs. Удельная поверхность 38 м 2 /г [10].

В работе использовали микрокремнезем конденсированный МК-85, который является отходом производства Братского алюминиевого завода (БрАЗ) по ТУ 5743-007-99958856–2014, ежегодный выход которого достигает 30 тыс. т. Микрокремнезем (МК) — это тонкодисперсный порошок, является продуктом ферросплавного производства, образующийся в процессе выплавки ферросилиция и его сплавов в результате восстановления углеродом кварца высокой чистоты в электропечах. В процессе выплавки кремниевых сплавов некоторая часть моноокиси кремния SiO переходит в газообразное состояние и, подвергаясь окислению и конденсации, образует чрезвычайно мелкий продукт в виде шарообразных частиц с высоким содержанием аморфного кремнезема со средней удельной поверхностью 20 м²/г, средний размер частиц 0,2 мкм.

Разработанная авторами добавка МТ-600, полученная методом термоактивации торфа без доступа воздуха, запатентована в ТГАСУ [9]. Различные методы переработки торфа позволяют направленно изменять состав и структуру торфяного сырья путем внешнего воздействия на различные группы органических и минеральных соединений, что дает возможность получать продукцию широкого ассортимента, в том числе и модифицирующие добавки различного функционального назначения с заданными составом и свойствами. В работе использован низинный торф Гусевского месторождения. Свойства торфа представлены в табл. 2.

Исследования проведены на образцах-кубиках размером $20 \times 20 \times 20$ мм из цементного теста нормальной густоты по ГОСТ 31108–2016, образцы твердели в воздушно-влажных условиях (T=18-20 °C, W=90-100 %) и испытывались на прочность в 3, 7 и 28 сут по ГОСТ 310.1–76 «Цементы. Методы испытаний.

Общие положения». Образцы твердели в нормальных условиях при температуре (20 ± 2) °C и влажности 95–98 % в ванне гидравлическим затвором. Фазовый состав образцов исследовался на дифрактометре XRD-6000 (Shimadzu, Япония) на CuKα-излучении. Анализ фазового состава проведен с использованием баз данных PCPDFWIN и PDF-4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDERCELL 2.5. Электронно-микроскопический анализ и анализ элементного состава добавок осуществлялся с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM 6000 в режимах обратно рассеянных и вторичных электронов и режиме элементного анализа. Для исследования процесса гидратации и изменений гидратных новообразований цементного камня проводился термографический анализ порошка цементного камня. Дериватографический анализ осуществлялся с использованием прибора STA 449 F3 Jupiter.

Tаблица 2 Основные физико-технические характеристики торфа

Месторождение	Вид торфа	Золь- ность, %	Степень разложения, %	Влажность,	рН
Гусевское	Низинный	26-28	25-30	18,5	7,1-7,5

Обсуждение результатов

Ранее проведенные исследования по оценке влияния наноразмерных частиц на свойства цементного камня [12] показали эффективность применения нано-SiO₂. В работе были приведены и обобщены результаты исследований по влиянию структурных характеристик нано-SiO₂, способов получения наноразмерных частиц, а также условий их введения в цементную матрицу на физико-механические свойства ЦК. Выявлено, что введение добавки Ts38 обеспечивает прирост прочности ЦК, по сравнению с контрольным образцом (до 50 %) при концентрации 0,03 % от массы цемента в 28-суточном возрасте твердения.

При производстве мелкозернистых бетонов актуальной является проблема увеличения расхода цемента, по сравнению с крупнозернистым, что приводит к повышению водоцементного отношения и, как следствие, снижению морозостойкости и водонепроницаемости. В работах [13–15] приводятся данные о микро- и макронеоднородности структуры, наблюдаемой в контактной зоне цемента и заполнителя в бетоне (повышенное содержание пор, трещин в структуре цементного камня). Таким образом, вопросы формирования плотной и однородной структуры бетона остаются актуальной проблемой.

Формирование плотной и прочной упаковки компонентов в структуре цементного камня может достигаться путем выстраивания его структуры «снизу-вверх», что предполагает введение в цементную систему частиц, меньших, чем вяжущее по размеру, и крупнее, чем наночастицы.

Для построения структуры цементного камня по принципу «снизу-вверх» в работе была предложена его физическая модель (рис. 2), в которой представленные в качестве компонентов добавки вещества отличаются не только по химическому составу, но и по удельной поверхности и размерам частиц.

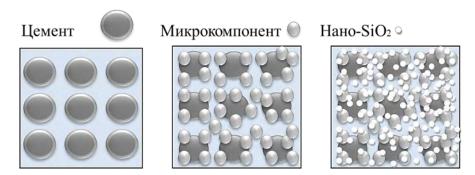


Рис. 2. Модель структуры цементного камня

В статьях [3–7, 12, 13] представлены результаты исследований, где в качестве микронаполнителей было предложено использовать МК, МСа, МТ-600. В исследованиях была установлена эффективность влияния совместного применения микронаполнителей с наноразмерным диоксидом кремния на свойства цементного камня. При введении микрокальцита в цементную композицию в количестве 5 % от массы цемента прочность цементного камня в 28 сут увеличилась на 45 %, при введении микрокремнезема — на 52 %, МТ-600 — на 41 %, по сравнению с контрольным образцом.

Таким образом, представленные результаты исследований показали возможность эффективного улучшения при введении предложенных модифицирующих добавок различных свойств ЦК, но при этом не изучена возможность объединения всех ранее обоснованных и исследуемых компонентов в полифункциональную добавку для обеспечения формирования более полного набора свойств ЦК.

Состав полифункциональной добавки определялся исходя из критерия обеспечения максимальной прочности, водонепроницаемости, морозостойкости и минимальной пористости бетона. Для определения состава комплексной полифункциональной добавки были выбраны следующие компоненты: микрокальцит (МСа), микрокремнезем (МК), термомодифицированный торф (МТ-600), наноразмерный диоксид кремния (Ts38).

Ранее проведенными экспериментальными исследованиями было показано, что сочетание комплексной добавки МК+Тs38 уплотняет и упрочняет структуру цементного камня, но остаются нерешенными вопросы по оптимизации порового пространства и водопотребности цементного камня. Введение МТ-600+ Ts38 обеспечивает затягивание пор и уплотняет структуру ЦК, но добавки МТ-600 недостаточно для получения высокачественного бетона. Совместное действие МСа + Ts38 обеспечивает сохранение эксплуатационных характеристик при 5 % снижении расхода портландцемента. Все три разработанные комплексные добавки могут быть рекомендованы для их применения в производстве бетонных смесей, растворов и сухих строительных смесей, но современное состояние науки и жесткие требования потребителей бетонов заставляют искать новые подходы к разработке и производству модифицирующих добавок. Так как во всех случаях прочность модифицированных образцов превышала прочность контрольного, то значительный интерес

Таблица 3

представляет исследование совместного действия всех компонентов комплексных добавок на физико-механические характеристики ЦК.

Для обеспечения повышения эффективности воздействия на основные характеристики цементного камня были проведены исследования по возможности получения комплексной полифункциональной добавки, включающей все ранее исследуемые в работе компоненты.

Для решения этой задачи составы добавки подбирались двумя способами: стехиометрически и экспериментально.

1. Состав: стехиометрически: МК – 14,4 %; MP – 80 %; МТ-600 – 5 %; Ts38-0.6 %.

Соотношения, в которых, согласно законам стехиометрии, вступают в реакцию вещества, называют стехиометрическими, так же называют соответствующие этим законам соединения. В стехиометрических соединениях химические элементы присутствуют в строго определённых соотношениях.

2. Состав: экспериментально: МК -45,2 %; MP -45,1 %; MT-600 -9,1 %; Ts38 -0,6 %.

Исходя из принятой в работе гипотезы для образования низкоосновных гидросиликатов кальция на микроуровне необходимо присутствие CaO и SiO_2 в определенном соотношении, именно поэтому оптимальное соотношение МК и МСа брали одинаковым (45 % из расчета на 100 % добавки). Содержание МТ-600 в добавке дополнительно связывает портландит в стабильные гидро-алюминаты кальция, т. к. содержит органоминеральные комплексы, активно принимающие участие в процессах гидратации и структурообразования ЦК, Ts38 ускоряет физико-химические процессы, происходящие на наноуровне.

Комплексная добавка готовилась путем смешивания компонентов в смесителе интенсивного действия с последовательной загрузкой компонентов, начиная с самой крупной фракции: микрокальцит, микрокремнезем, МТ-600 и Тs38. Общее время перемешивания составляло 20 мин. В процессе смешивания происходит домол крупных фракций с одновременной совместной активацией всех компонентов добавки и цемента. В табл. 3 представлен элементный состав компонентов добавки.

Состав компонентов добавки

Наименование	Микрокремнезем	Микрокальцит	Ts38	MT-600
SiO_2	+	+	+	+
CaO		+		+
Al	+			+
С	+	+		+
MgO	+	+		+

Из данных, приведенных в табл. 3, видно, что элементный состав всех 4 компонентов комплексной добавки качественно совпадает.

Для исследования прочностных свойств цементного камня с разработанными полифункциональными добавками были изготовлены образцы цементного камня размером $20\times20\times20$ мм, которые твердели в нормальных условиях и испытывали на прочность в 3, 7, 28, 120 сут твердения.

Анализ данных, представленных на рис. 3, подтвердил, что наиболее эффективным составом комплексной добавки является: МК – 45,2 %; МСа – 45,1 %; MT-600 - 9,1 %; Ts38 - 0,6 %, добавляемый в цементное тесто в количестве 5 %, что согласуется с данными цемент-прогноза. Введение полифункциональной добавки (ПД) повышает прочность цементного камня на 38 % (3 сут твердения), в 7 сут – до 29 %, в поздние сроки твердения (28 сут) – на 83 %, в 120 сут – на 74 %, по сравнению с контрольным образцом. Удельная поверхность разработанной добавки $S_{vg} = 2,528 \text{ м}^2/\Gamma$, что близко к значению удельной поверхности микрокремнезема. Для выявления закономерностей, происходящих при гидратации и структурообразовании модифицированного ПД ЦК, был проведен комплекс физико-химических исследований. Для установления разницы температур во времени при твердении портландцемента между эталонным образцом (сухая проба модифицированного цемента) и увлажненным (та же проба, но с водой затворения) были проведены исследования на дифференциальном микрокалориметре. На рис. 4 представлен график, показывающий характер изменения разницы температур при твердении цемента в течение 2 сут.

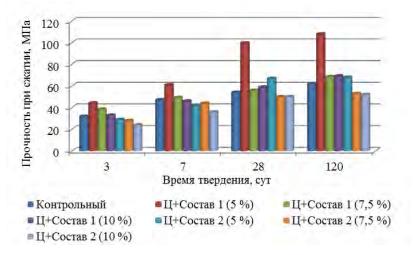


Рис. 3. Кинетика набора прочности при сжатии ЦК с исследуемыми добавками



Рис. 4. Тепловыделение цемента при смачивании

Первый пик (2 ч) у образцов соответствует индукционному периоду гидратации и практически совпадает с незначительным изменением разницы температуры, равной 0,15 градусов. У контрольного образца цементного камня запас энергии на кристаллизационный период достигает 22 ч, у образца с исследуемой добавкой – более высокий запас энергии, который интенсифицирует процессы кристаллизации в ЦК с изменением первичных продуктов гидратации (26–29 ч) (гидроксид кальция, эттрингит и гелеобразные гидросиликаты кальция). В процессе кристаллизации продуктов гидратации цементного камня кристаллическая структура этих соединений совершенствуется, портландит и эттрингит образуют первичный кристаллический каркас цементного камня, а гидросиликаты кальция заполняют поровое пространство кристаллического каркаса.

Для изучения фазовых превращений, происходящих в цементной системе, и оценки потери химически связанной воды в интервале температур от 0 до 1000 °C проводился дериватографический анализ (ДТА). На рис. 5 представлена дериватограмма модифицированного образца цементного камня с кривыми изменения массы (ТГ) и тепловых эффектов (ДСК).

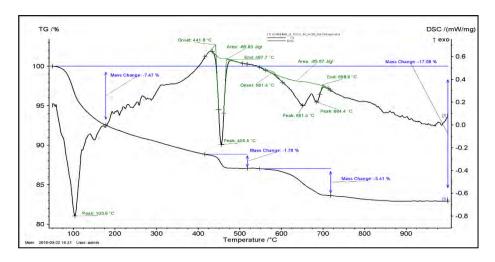
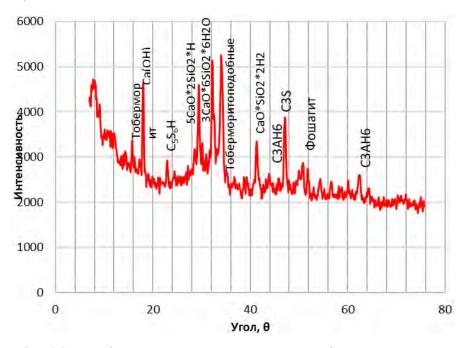


Рис. 5. Дериватограмма образца цементного камня, модифицированного комплексной полифункциональной добавкой

На дериватограмме (рис. 5) цементного камня с добавкой ПМД к 28 сут твердения зафиксированы эндоэффекты при 90–110 °C, что соответствует потере свободной воды, эндоэффект при 440–487 °C относится к разложению гидроксида кальция образованием низкоосновных ГСК типа C-S-H(I) и $C_3S_6H_6$, эндоэффект при 581–698 °C, соответствующий дегидратации высокоосновных гидросиликатов кальция (ГСК). Введение ПД приводит к изменению фазового состава цементного камня с формированием структуры в основном из низкоосновных ГСК и стабильных гидроалюминатов кальция – C_3AH_6 (эндоэффект при 455 °C) и CAH_{10} , которые не подвергаются процессам перекристаллизации и способствуют повышению прочности цементного камня.

Для изучения влияния исследуемых добавок на процессы гидратации и структурообразования ЦК, а также выявления в нем новых фаз проведен рентгенофазовый анализ модифицированных образцов цементного камня. На рис. 6 представлена рентгенограмма исследуемого образца модифицированного цементного камня.



Puc. 6. Рентгенофазовый анализ цементного камня, модифицированного комплексной полифункциональной добавкой

Из результатов рентгенограммы видно, что введение комплексной полифункциональной добавки способствует формированию в цементном камне стабильных гидроалюминатов кальция типа C_3AH_6 ($d/n=2,07;\ 1,68\cdot 10^{-10}\ M$), низкоосновных гидросиликатов кальция: тоберморит и тоберморитоподобные соединения ($d/n=5,61;2,62\cdot 10^{-10}\ M$), $5CaO\cdot 2SiO_2\cdot H_2O$ ($d/n=3,02\cdot 10^{-10}\ M$), $3CaO\cdot 6SiO_2\cdot 6H_2O$ ($d/n=2,77\cdot 10^{-10}\ M$), C_3S ($d/n=1,92\cdot 10^{-10}\ M$), $C_3S_6H_5$ ($d/n=3,34\cdot 10^{-10}\ M$), фошагит ($d/n=1,79\cdot 10^{-10}\ M$), значительно улучшающих физико-механические характеристики цементного камня. Данное соотношение «добавка-цемент» способствует аморфизации структуры цементного камня, что подтверждается на рентгенограммах повышенным фоном в области малых углов и снижением интенсивности пиков кристаллических фаз. По результатам качественного рентгенофазового анализа установлено, что при введении ПМД в портландцементе снижается интенсивность пиков $Ca(OH)_2$, что может говорить о связывании его в гидросиликаты кальция, что подтверждает наличие дополнительных пиков на рентгенограммах.

Для подтверждения полученных результатов по формированию структуры ЦК с комплексной полифункциональной добавкой проводили электронно-микроскопический анализ (рис. 7–9).

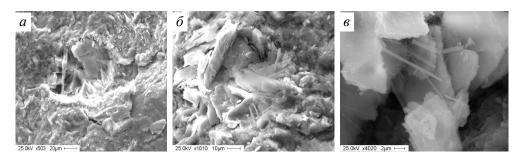


Рис. 7. Электронно-микроскопический снимок контрольного цементного камня: $a - \times 500$; $\delta - \times 1000$; $s - \times 4000$

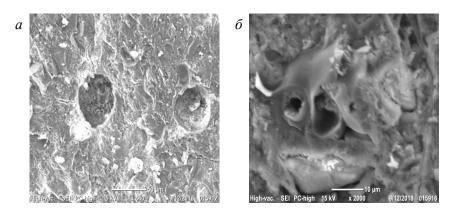


Рис. 8. Электронно-микроскопический анализ модифицированного цементного камня полифункциональной добавкой на поверхности скола: $a - \times 400$; $\delta - \times 2000$

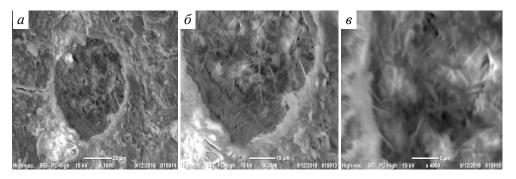


Рис. 9. Электронно-микроскопический анализ модифицированного цементного камня полифункциональной добавкой порового пространства: $a - \times 1000; \, 6 - \times 2000; \, e - \times 4000$

Методом растровой электронной микроскопии установлено, что структура цементного камня с добавкой отличается от контрольного (бездобавочного) наличием в трещинах и порах дополнительного количества новообразований в виде плотных скоплений волокнистых кристаллов, морфология которых идентична гидросиликатам кальция типа CSH (B). Тогда как контрольный

образец ЦК характеризуется достаточно неоднородной и дефектной структурой с менее закристаллизованным поровым пространством, что обусловлено неравномерным распределением и ростом продуктов гидратации в объеме цементной матрицы.

Проведенные исследования позволили сделать вывод о перспективности и эффективности разработанной комплексной полифункциональной добавки. Все компоненты добавки согласуются друг с другом. Синергизм действия добавки обеспечивает повышенные характеристики качества цементных композиций вместе со снижением стоимости конечного материала за счет использования компонентов местных ресурсов либо отходов камнедробления. Таким образом, введение ПД в состав цементного теста в значительной степени влияет на процессы гидратации клинкерных минералов, изменяя как свойства цементного теста, так и свойства затвердевшего цементного камня. Механизм действия ПД является комплексным, т. к. добавка имеет различные по происхождению и размеру частицы, которые могут выступать в качестве наполнителя, способствовать связыванию портландита в низкоосновные гидросиликаты кальция и стабильные гидроалюминаты кальция, образовывать дополнительные центры кристаллизации. Полученная комплексная добавка обладает синергетическим эффектом влияния на свойства цементного камня, усиливая эффект от действия каждого компонента в отдельности.

Библиографический список

- Drexler K.E., Peterson C., Pergamit G. Unbounding the future: the nanotechnology revolution Свободное будущее: нанотехнологическая революция. New York: William Morrow. 1991.
- 2. Демьяненко О.В., Копаница Н.О. Влияние наночастиц диоксида кремния на эксплуатационные свойства цементных систем // Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. С. 408–411.
- 3. *Копаница Н.О., Саркисов Ю.С., Демьяненко О.В.* Peculiarities of silica additives application in building mixes production // American Institute of Physics. 1800. P. 020010.
- 4. *Копаница Н.О.*, *Саркисов Ю.С.*, *Демьяненко О.В.* Применение нанодисперсного кремнезема в производстве строительных смесей // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 5. С. 140–150.
- Космачев П.В., Власов В.А., Копаница Н.О., Скрипникова Н.К., Демьяненко О.В. Композиционные материалы на основе цемента с нанодисперсным диоксидом кремния // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4. С. 139–146.
- 6. Копаница Н.О., Сорокина Е.А. Демьяненко О.В. Влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3d-печати // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 4. С. 122–134.
- Копаница Н.О., Саркисов Ю.С., Демьяненко О.В., Горшкова А.В. Цементные композиции, модифицированные комбинированными нанодисперсными добавками // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4. С. 101–106
- 8. Абзаев Ю.А., Копаница Н.О., Клименов В.А., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Демьяненко О.В. Моделирование структурного состояния аморфного таркосила // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 3 (50). С. 121–133.

- 9. *Пат.* № 2576766. Российская Федерация. Способ получения модифицирующей добавки для цементной композиции и цементная композиция / Н.О. Копаница, А.В. Касаткина, О.В. Демьяненко, Ю.С. Саркисов, Н.П. Горленко. Приоритет 21.01.2015.
- Advanced Concrete Technology // Constituent Materials / Ed. J. Newman, B.S. Choo. Elsevier, 2003. 280 p.
- Горшкова А.В. Сухие строительные смеси с модифицирующей добавкой на основе торфа: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск, 2015. 161 с.
- Демьяненко О.В., Куликова А.А. Эффективность применения микрокальцита в производстве цементных композиций на цементной основе // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ 2017). Избранные доклады IV Международной научной конференции студентов и молодых ученых. 2017. С. 39–41.
- Demyanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sarkisov Y.S., Abzaev Y.A., Ikonnikova K.V., Ikonnikova L.F. Quantitative phase analysis of modified hardened cement paste. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. No 87(9) [092008] DOI: https://doi.org/10.1088/ 1755-1315/87/9/092008

REFERENCES

- 1. Drexler K.E., Peterson C., Pergamit G. Unbounding the future: the nanotechnology revolution. New York: William Morrow, 1991.
- Dem'yanenko O.V., Kopanica N.O. Vliyanie nanochastic dioksida kremniya na ekspluatacionnye svojstva cementnyh sistem [Effect of silicon dioxide nanoparticles on operational properties of cement systems]. Materialy II Vserossijskoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh s mezhdunarodnym uchastiem (Proc. 2nd All-Russ. Sci. Conf. of Young Scientists). Tomsk, 2015. Pp. 408–411. (rus)
- Kopanica N.O., Sarkisov Yu.S., Dem'yanenko O.V. Peculiarities of silica additives application in building mixes production. American Institute of Physics. 1800. P. 020010.
- Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S., Dem'yanenko O.V. Primenenie nanodispersnogo kremnezema v proizvodstve stroitel'nyh smesej [Nanodispersed silicon dioxide used in the production of mix mortars]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2016. No. 5. Pp. 140–150. (rus)
- Kosmachev P.V., Dem'yanenko O.V., Kopanica N.O., Skripnikova N.K., Vlasov V.A. Kompozicionnye materialy na osnove cementa s nanodispersnym dioksidom kremniya [Composite materials based on cement with nanodispersed silicon dioxide]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2017. No. 4 (63). Pp. 139–146 (rus)
- Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A. Vliyanie dobavki termomodifitsirovannogo
 torfa na tekhnologicheskie svoistva stroitel"nykh smesei dlya 3d-pechati [Performance characteristics of 3D printing construction mixes depending on thermally-modified peat additive].

 Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta Journal of
 Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 122–134. (rus)
- Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S, Gorshkova A.V. Cementnye kompozicii, modificirovannye kombinirovannymi nanodispersnymi dobavkami [Cement compositions modified by combined nanodispersed additives]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2017. No. 4. Pp. 101–106. (rus)
- 8. Abzaev Yu.A., Kopanica N.O., Klimenov V.A., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Dem'yanen-ko O.V. Modelirovanie strukturnogo sostoyaniya amorfnogo tarkosila [Structural state modeling of amorphous tarkosil]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2015. No. 3 (50). Pp. 121–133. (rus)
- Kopanica N.O., Kasatkina A.V., Dem'yanenko O.V., Sarkisov Yu.S, Gorlenko N.P. Sposob polucheniya modificiruyushchej dobavki dlya cementnoj kompozicii i cementnaya kompoziciya [Production method for modifying additive for cement composition]. Patent Russ. Fed. N 2576766, 2015. (rus)
- Newman J., Choo B.S. (Eds). Advanced concrete technology. In: Constituent materials. Elsevier, 2003. 280p. (rus)

- 11. *Gorshkova A.V.* Suhie stroitel'nye smesi s modificiruyushchej dobavkoj na osnove torfa. Dis.kand. tekhn.nauk [Dry construction mixtures with peat-based modifying additive. PhD Thesis]. Tomsk, 2015. 161 p. (rus)
- 12. Dem'yanenko O.V. Kulikova A.A. Effektivnost' primeneniya mikrokal'cita v proizvodstve cementnyh kompozicij na cementnoj osnove [Microcalcites in cement-based composition production]. Molodezh', nauka, tekhnologii: novye idei i perspektivy. Izbrannye doklady IV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii studentov i molodyh uchenyh (Proc. 1st Int. Sci. Conf. 'Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects'). 2017. Pp. 39–41. (rus)
- Demyanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sarkisov Y.S., Abzaev Y.A., Ikonnikova K.V., Ikonnikova L.F. Quantitative phase analysis of modified hardened cement paste. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. No. 87 (9) [092008]. DOI: 10.1088/1755-1315/87/9/092008

Сведения об авторах

Демьяненко Ольга Викторовна, аспирант, Томский государственный архитектурностроительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, demyanenko.olga.v@gmail.com

Куликова Анжелика Андреевна, магистрант, Томский государственный архитектурностроительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lika.panda.19@gmail.com

Копаница Наталья Олеговна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,

Authors Details

Olga V. Dem'yanenko, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, demyanenko.olga.v@gmail.com

Anzhelika A. Kulikova, Undergraduate, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lika.panda.19@gmail.com

Natal'ya O. Kopanitsa, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kopanitsa@mail.ru