

Е.В. ТКАЧ¹, Р.И. ТЕМИРКАНОВ¹, О.В. РУЖИЛО²

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

²ООО «Холсим (Рус) СМ», Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ И МИКРОАРМИРУЮЩИМИ ВОЛОКНАМИ

Аннотация. Основной задачей осуществления экологической политики является создание ресурсоэффективной системы размещения и утилизации промышленных отходов и вторичного сырья, в частности, при производстве строительных материалов и изделий заданных свойств. В рамках данных исследований рассмотрены вопросы, связанные с активацией микрокремнезема, являющийся отходом ферросплавного производства и способы его применения для модифицирования структуры цементного камня, в частности, для тяжелого бетона. Определены механизм процесса структурообразования, способ введения и оптимальный расход добавки для модифицирования бетонной смеси. С помощью комплексного исследования определены продукты диспергирования микрокремнезема, входящего в состав комплексного модификатора. Установлено, что процесс действия химической активации минеральных частиц изучен недостаточно, в связи с этим представленные исследования, заключающиеся в поиске решений повышения эксплуатационных характеристик за счет процесса предварительной обработки микрокремнезема щелочной средой $pH=10.2$ совместно с микроармирующим компонентом, являются актуальными.

Целью исследования является установить положительное действие процесса активации микрокремнезема совместно с микроармирующим компонентом на модифицирование структуры тяжелого бетона для повышения гидрофизических свойств. Объект исследования - модифицированный тяжелый бетон на основе активированного микрокремнезема совместно с микроармирующим компонентом. В данной работе применялись следующие методы исследования: физико-химическая активация микрокремнезема водой, обработанная методом электролиза прибором «Мелеста»; определение марки морозостойкости в климатической камере WK3 180/40; водонепроницаемость определяли в установке УВБ-МГ4.01; водопоглощение определяли, используя электрическую цифровую печь СНОЛ.

Результаты исследования: установлено положительное влияние на гидрофизические свойства тяжелого бетона путем уменьшения содержания вяжущего (цемента) и замены его микродисперсным наполнителем, предварительно активированным щелочной средой с $pH=10.2$. Дальнейшее модифицирование комплексной добавкой (высоководоредуцирующая добавка «MasterGlenium 115» с расходом 1% плюс реакционно-химическая добавка микрокремнезем марки МКУ-95 – 15% от массы вяжущего) совместно базальтовым волокном, позволяет улучшить следующие характеристики: водопоглощение – 2%; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость – F600, что дает возможность применять данный состав на практике для получения строительных изделий и конструкций с заданными характеристиками в суровых условиях эксплуатации.

Ключевые слова: морозостойкость, водонепроницаемость, водопоглощение, кремнезем, базальтовое волокно, гидрофизические свойства.

E.V. Tkach¹, R.I. Temirkanov¹, O.V. Ruzhilo²

¹National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia

²LafargeHolcim (Russia), Moscow, Russia

STUDY OF THE HYDROPHYSICAL PROPERTIES OF HEAVY CONCRETE MODIFIED WITH AN ORGANOMINERAL ADDITIVE AND MICRO- REINFORCING FIBERS

Abstract. The main task of the implementation of environmental policy is to create a resource-efficient system for the placement and disposal of industrial waste and secondary raw materials, in particular, in the production of building materials and products of specified properties. Within the framework of these studies, issues related to the activation of microsilica, which is a waste of ferroalloy production, and methods of its use for modifying the structure of cement stone, in particular, for heavy concrete, are considered. The mechanism of the structure formation process, the method of introduction and the optimal consumption of the additive for modifying the concrete mixture have been determined. With the help of a comprehensive study, the products of dispersion of microsilica, which is part of the complex modifier, have been determined. It has been established that the process of the chemical activation of mineral particles has not been sufficiently studied, in this regard, the presented studies, which consist in finding solutions to increase the operational characteristics due to the process of pretreatment of microsilica with an alkaline medium $pH = 10.2$ together with a micro-reinforcing component, are relevant.

The aim of the study is to establish the positive effect of the activation process of silica fume together with a micro-reinforcing component on the modification of the structure of heavy concrete to increase the hydrophysical properties. The object of research is a modified heavy concrete based on activated microsilica with a micro-reinforcing component. In this work, the following research methods were used: physicochemical activation of microsilica with water, treated by electrolysis with the Melesta device; determination of the frost resistance grade in the WK3 180/40 climatic chamber; water tightness was determined in the UVB-MG4.01 installation; water absorption was determined using a SNOL electric digital oven.

Research results: a positive effect on the hydrophysical properties of heavy concrete was established by reducing the content of the binder (cement) and replacing it with a microdispersed filler previously activated with an alkaline medium with $pH = 10.2$. Further modification with a complex additive (high-water-reducing additive "MasterGlenium 115" with a consumption of 1% plus a reaction-chemical additive with microsilica grade MKU-95 - 15% of the binder mass) together with basalt fiber, improves the following characteristics: water absorption - 2%; waterproof grade - W14; frost resistance - F600, which makes it possible to apply this composition in practice to obtain building products and structures with specified characteristics in harsh operating conditions.

Keywords: frost resistance, water resistance, water absorption, silica, basalt fiber, hydrophysical properties.

Введение

Тяжелые бетоны применяются в качестве конструкционных материалов, работающих в суровых условиях эксплуатации при возведении конструкций для зданий и сооружений гражданского, промышленного и специального назначения, что обусловлено их высокой прочностью (до 150 МПа и выше), морозостойкостью ($F1 = 1000$), плотностью (до 2500 кг/м³), водонепроницаемостью (W20), коррозионной стойкостью в агрессивных средах. В настоящее время активно проводятся исследования по модифицированию бетонов за счет применения химических добавок-модификаторов, а также микро- и нанодисперсными добавками (углеродные нанотрубки, силикатные микросфера, наночастицы оксидов металлов и др.) [5-7].

Преимуществами таких бетонов по сравнению с традиционными являются повышенные показатели качества: физико-механические характеристики (прочность на сжатие, растяжение при изгибе, трещиностойкость), что связано с повышением плотности и модифицированием структуры цементного камня. Вместе с тем, по ряду физико-механических характеристик тяжёлые бетоны не соответствуют современным требованиям, предъявляемым к современным строительным материалам и изделиям на их основе. Для улучшения их эксплуатационных характеристик в последнее время проводятся исследования в направлении модифицирования цементных бетонов путем введения в состав эффективных комплексных добавок, содержащих активные частицы кварца [8-12], а также микроармирующие компоненты [13-17], что является перспективным и ресурсосберегающим направлением развития материаловедения. Имеющиеся в литературе данные по этой проблеме [9,10,16] не позволяют составить целостного представления о влиянии состава бетонной смеси, перевода частиц аморфного микрокремнезема в активную форму в щелочной среде совместно с микроармирующим компонентом в виде полипропиленовой фибры или базальтового волокна на физико-механические свойства. В связи с чем изучение синергетического эффекта

воздействия микроармирующего волокна и активированного микрокремнезема на эксплуатационные характеристики тяжелого бетона является актуальным как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

Одним из путей решения проблемы повышения характеристик тяжёлых бетонов является введение в состав бетонных смесей активных минеральных добавок - золы-уноса, микрокремнезема, золы рисовой шелухи. В этом направлении наиболее перспективные результаты получены в работах [1-3,4,8].

В работе [4] авторы приводят результаты исследований бетонной смеси с комплексным модификатором, в состав которой входят зола рисовой шелухи, зола-уноса (неорганическая составляющая), плюс суперпластификатор С-3 или Sika ViscoCrete 5-New (органическая составляющая). Выявлен двоякий механизм действия модификаторов в цементных системах: «химический» фактор - содержание в своем составе диоксида кремния в аморфной модификации и золы рисовой шелухи высокой дисперсности; «физический» фактор - заполнения пространства между кристаллогидратами и сокращения объема свободной воды, приводящий к снижению капиллярной пористости цементного камня и повышению количества гелевых пор. Введение в бетонную смесь золы рисовой шелухи и золы-уноса с расходом каждой добавки равной 10% совместно с суперпластификатором Sika ViscoCrete 5-New расходом 1,5% от массы вяжущего вещества повышает в возрасте 28 суток прочность на растяжение при изгибе на 10%, приизменную прочность – 19,5%, кубиковую прочность при сжатии на 18,2%, по отношению к контрольному образцу. Результаты использования данной добавки при получении высокопрочного бетона также приведены в работах [3,8], которые не вполне соответствуют данным [10]. Расхождения можно объяснить содержанием кварца в активных минеральных добавках и рекомендуемым расходом комплексной добавки. Другие типы добавок, способствующих улучшению характеристики трещиностойкости бетонов, исследованы в работах [12-15]. В работе [16] исследования основаны на изучении влияния дисперсного армирования полипропиленовым волокном на бетонные элементы. Показано, что введение в мелкозернистую бетонную смесь полипропиленовой фибры с расходом 4 кг/м³ и длиной элементарного волокна 6 мм, способствует повышению предела прочности при сжатии на 25,4% и при изгибе на 51,2% относительного контрольного состава. При этом отмечается эффект «переармирования» материала при повышении рекомендуемого расхода волокна, что негативно влияет на физико-механические характеристики исследуемых образцов бетона. Дальнейшее увеличение содержания полипропиленового волокна уменьшает толщину цементного камня между ними, что приводит к расслоению и нарушению сплошности образца. Аналогичное изменение вышеуказанных показателей по сравнению с контрольными образцами наблюдали в работах [14,15].

Более перспективным с точки зрения ресурсоэффективности является использование модификаторов, содержащих в своем составе аморфный микрокремнезем, являющийся более доступным и экологически безопасными отходом ферросплавного производства. Преимуществом его применения является способность позитивно воздействовать на основные эксплуатационные свойства тяжелого бетона: водонепроницаемость, прочность, морозостойкость, износостойкость, выносливость, стойкость к хлоридной, сульфатной коррозии, сопротивляемость к воздействию морской воды и слабых кислот [4,8]. Ряд модификаторов изучены в работах зарубежных авторов [10-14]. В исследовании [17] показано, что введение комплексной добавки суперпластификатор GleniumACE 430 совместно с микрокремнеземом в бетонную смесь на основе гидравлического вяжущего вещества, повышает морозостойкость до 400 циклов и выше, что связано с аморфизацией структуры цементного камня. Результаты использования этой добавки при получении высокопрочного тяжелого бетона также приведены в работах [2-4,8], которые не вполне соответствуют данным [17]. Расхождения можно объяснить различным способом введения и дозировкой модификатора. Анализ литературных данных [2-20] по составу и характеристикам бетонов, влияния комплексных модификаторов на прочностные и эксплуатационные характеристики

показал, что вопросы снижения расхода микрокремнезема, путем перевода частиц в активную форму, и совместное влияние дисперсного армирования на заданные характеристики изучаемого материала до сих пор остаются невыясненными. В связи с этим целью настоящей работы являлось разработка органоминеральной композиции с оптимальным расходом активированного микрокремнезема и микроармирующего волокна для повышения прочностных, деформативных и гидрофизических характеристик тяжелого бетона.

Модели и методы

Для получения бетонов в работе использовали исходные материалы со следующими характеристиками. Вяжущим являлся портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н, производитель ООО "Холсим (Рус) Строительные Материалы" (г. Калуга). Химический и минеральный состав цемента определяли при помощи рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализов, результаты которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Химический и минеральный состав портландцемента

Марка цемента	Химический состав, мас. %						
	Na ₂ O	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
ЦЕМ I 42,5Н	0,57	0,3	0,69	3,75	65,36	4,89	24,44
	Содержание кристаллических фаз в клинкере, мас. %						
	C ₄ AF (4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃)	C ₃ A (3CaO·Al ₂ O ₃)	C ₂ S (2CaO·SiO ₂)	C ₃ S (3CaO·SiO ₂)			
	11,46	7,84	12,62	68,08			

Дисперсный состав, технологические и прочностные характеристики цемента и получаемого из него цементного камня определяли с использованием ситового анализа (контролировали тонкость помола цемента прохождения через сите № 008 с размером ячеек 80 мкм не менее 85% массы просеиваемой пробы), пикнометрического метода (истинная плотность цемента составила 3156 кг/м³), определения прочности на изгиб и сжатие (универсальный испытательный блок UPB 86/ 200, Form+Test, Германия) в соответствии со стандартными методиками. Для определения механической прочности готовили образцы-балочки размером 4×4×16см из цементно-песчаного раствора с водоцементным отношением В/Ц=0,4. После изготовления образцы в формах содержали 1 сутки в ванне с гидравлическим затвором, в которой обеспечивался режим: относительная влажность воздуха не менее 90% и температура среды (20±2)°С. Через сутки образцы расформовали и в затем 27 суток хранили в ванне с водой, температуру в которой контролировали в пределах (20±2)°С. По истечении срока хранения образцы-балочки вынимали из ванны с водой и не позднее, чем через 30 мин испытывали на прочностные характеристики. Полученные результаты приведены в таблице 2.

По результатам испытаний установлено, что цемент соответствует требованиям стандарта по нормируемым показателям: тест на равномерность изменения объема, начало схватывания цементного теста, прочности при сжатии через 2 и 28 суток.

Таблица 2 - Результаты определения характеристик портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н

Показатель	Результаты измерений	Нормируемые значения по ГОСТ 31108-2016
Остаток на сите 45 мкм, %	2,9	-
Остаток на сите 80 мкм, %	0,3	-
Площадь удельной поверхности, см ² /г	3545	-
Истинная плотность, кг/м ³	3156	-
Насыпная плотность, кг/м ³	1248	-
Нормальная густота, %	27	-
Тест на равномерность изменения объема (кольцо Ле-Шателье)	Выдерживает	Выдерживает
Начало схватывания, мин	197	Не ранее 60
Прочность при сжатии в возрасте 2 сут., МПа	24,7	Не менее 10
Прочность при сжатии в возрасте 28 сут., МПа	57,5	Не менее 42,5

В качестве мелкого заполнителя использовали природный песок с модулем крупности 2,4 с размером частиц от 0,16 мм до 2,5 мм (поставщик ООО «СТМ-Неруд», г. Чехов, Московская область). Основной фазой песка являлся SiO_2 в кристаллической модификации кварц, тридимит и кристобалит. Содержание примесей не превышало 1,5%, в состав примесей входили пылевидные и глинистые примеси.

В качестве крупного заполнителя использовали гранитный щебень фракции от 5 до 20 мм производства ООО «Сунский карьер», г. Петрозаводск, соответствующий требованиям по содержанию зерен пластинчатой и игловатой формы – 13,0 %; пылевидных, илистых и глинистых частиц – 0,97 %; марка щебня по дробимости – 1400; марка щебня по морозостойкости – 300; насыпная плотность – 1350 кг/м³; удельная эффективная активность радионуклидов ($A_{\text{эфф}}$) – 92 Бк/кг; марка щебня по истираемости И-1. Максимум в распределении щебня по размерам приходился на 20 мм. Исследуемый заполнитель относится к среднезернистому типу кристаллической структуры.

Для затворения бетонных смесей использовали водопроводную воду с содержанием сульфатов 2500 мг/л (в пересчете на SO_4) и содержанием всех солей 3600 мг/л/ Для сохранения марки по жесткости (Ж1), водоцементное отношение не изменяли ($\text{В/Ц}=0,35$).

Для повышения подвижности бетонных смесей в них вводили гиперпластификатор «MasterGlenium 115» на основе эфира поликарбоксилата, (производитель ООО «БАСФ Строительные системы», г. Краснодар), расход которого составлял 1% от массы вяжущего вещества, рекомендованный производителем, модификатор вводили в бетонную смесь одновременно с водой затворения, из расчета 4,2 кг на 1 м³ готовой смеси.

В качестве активной минеральной добавки в бетонные смеси вводили микрокремнезем марки МКУ-95 (производитель ООО "РУСАЛ Кремний Урал", г. Каменск-Уральский) с интервалом варьирования в количестве от 10 до 20% от массы вяжущего вещества, его химический состав отображен в таблице 3. Микрокремнезём данной марки является отходом производства ферросилиция, содержащий пылевидные частицы размером от 0,87 мкм до 76,06 мкм. Микрокремнезём вводили в бетонные смеси на этапе смещивания крупного и мелкого заполнителя с цементом.

Таблица 3 - Химический состав микрокремнезема МКУ-95 в соответствии со спецификацией

Компонент	Содержание, мас.%, не более
SiO_2	97,00
P_2O_5	0,49
MgO	0,48
Al_2O_3	0,12
Fe_2O_3	0,22
SO_3	0,20
CaO	0,26
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	1,04
H_2O	0,19

В ряде экспериментов использовали активированный микрокремнезем. Активацию проводили методом электролиза (прибор «Мелеста», производитель ООО «МВП») с применением электродов: катод, выполненный из нержавеющей стали, анод – из титана покрытого оксидом рутения. В прибор заливали водопроводную воду в объеме 0,8л и проводили электролиз в соответствии с паспортными данными прибора до температуры нагревания воды 35°C.

Для повышения трещиностойкости бетонов в бетонную смесь вводили микроармирующие компоненты – полипропиленовую фибру или рубленое базальтовое волокно (ООО «Европолис», г. Дубна, Московская область) на этапе сухого перемешивания вяжущего (портландцемента) совместно с мелким и крупным заполнителем. Характеристики микроармирующих компонентов приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Характеристики микроармирующих компонентов

№ п/п	Характеристика	Фибра полипропиленовая	Рубленое базальтовое волокно
1	Длина отрезка, мм	13...14	12
2	Диаметр единичного волокна, мкм	63	17
3	Плотность, г/см ³	0,89	2,65
3	Температура плавления, °С	165	1450
4	Удлинение при разрыве, %	25...40	1,2...3,5
5	Стойкость к щелочам и коррозии	невысокая	высокая
6	Прочность на растяжение, R, МПа·10 ³	0,55	3,1...3,6
8	Модуль упругости F _f , МПа·10 ³	3,2	100...124

Процессы физико-химической активации микрокремнезема водой, обработанной методом электролиза, основанного на ее обработке для получения католита и анолита. Для испытания гидрофизических характеристик использовались следующие методики и оборудование: определение марки морозостойкости в климатической камере WK3 180/40, водонепроницаемости в установке УВБ-МГ4.01, водопоглощение при помощи электрической цифровой печи СНОЛ.

Для повышения стойкости строительных изделий и конструкций в суровых условиях эксплуатации необходимо также улучшить гидрофизические свойства бетона, такие как водонепроницаемость и водопоглощение, и морозостойкость которые значительно повышают долговечность и безотказный срок службы конструкций.

Для определения водопоглощения и водонепроницаемости были подготовлены образцы-цилиндры диаметром 150 мм и высотой 100 мм из исследуемых бетонных смесей, исходя из того, что наибольшая крупность зерен заполнителя равна 20 мм. Водопоглощение определяли путем взвешивания предварительно насыщенных водой образцов-цилиндров через каждые 24 часа до момента, когда два последовательных результата взвешиваний будут отличаться не более чем на 0,1 %. Водонепроницаемость определялась методом «мокрого пятна». Для каждого исследуемого состава было подготовлено по 6 образцов, которые хранили на решетке над водой (в камере нормального твердения) с температурой $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, относительной влажности воздуха $95 \pm 5\%$, а затем предварительно выдерживали перед проведением испытаний в течение 1 суток на воздухе с температурой $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Процесс проведения испытаний, в виде повышения давления воды, происходил путем нагружения ступенями с шагом 0,2 МПа в течение 1-5 минут и длительностью нагружения на каждой ступени 12 ч. Водонепроницаемость каждого образца-цилиндра оценивалась фиксированием максимального значения давления воды, при котором на торцевой поверхности образца, противоположной его поверхности, через которую под давлением подавалась вода, не наблюдалось ее просачивание через тело образца в виде проявления мокрого пятна или признаков фильтрации воды в виде капель. Для определения водонепроницаемости серии бетонных образцов, оценивалось максимальным давлением воды, при котором не менее чем на четырех образцах из шести, не наблюдалась фильтрация воды.

Для проведения испытаний на морозостойкость применялся первый базовый метод при многократном замораживании и оттаивании в водонасыщенном состоянии в соответствии с методикой, в которой установлены условия испытания: вода для насыщения и оттаивания с температурой $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ и с температурой замораживания минус $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Определение марки морозостойкости бетона проводились на образцах с ребрами $100 \times 100 \times 100$ мм в возрасте 28 суток. При этом строго соблюдался режим испытания – время замораживания образцов не менее 2,5 часов и оттаивание на протяжении $2 \pm 0,5$ часов; при появлении сколов, трещин и шелушения ребер в процессе испытания образца - исследование прекращалось.

Результаты исследования и их анализ

Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость бетона представлены в таблице 5. Анализ полученных данных таблицы 5 показывает, что бетон в

состав которых входит активированный микрокремнезем совместно с базальтовым волокном (состав 5) имеет пониженные показатели водопоглощения в сравнении с контрольным (состав 1) на 57%. Водонепроницаемость модифицированного бетона (состав 5) повысилась на 6 марок (ступеней нагружения) в сравнении с контрольным составом бетона (без модификаторов состав 1), на 4 ступени относительно составов без волокна (составы №2, 3) и на 2 ступени относительно состава с полипропиленовой фиброй (состав №4).

Таблица 5 - Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость бетона

№ Состава	Модификатор, % от массы цемента для микрокремнезема и % от объема для волокна	Водопоглощение, %	Водонепроницаемость образцов, МПа	Марка бетона по водонепроницаемости
1	Контрольный, без модификаторов	3,5	0,8	W8
2	МКУ-95, 15%	2,3	1,0	W10
3	Активированный МКУ-95, 15%	2,15	1,0	W10
4	Активированный МКУ-95, 15%; Полипропиленовая фибра, 0,75%	2,1	1,2	W12
5	Активированный МКУ-95, 15%; Базальтовое волокно, 0,75%	2,0	1,2	W14

Повышение гидрофизических свойств объясняется повышением качества структуры модифицированного цементного камня и бетона на его основе в присутствии комплексного модификатора (высоководоредуцирующая добавка «MasterGlenium 115» плюс реакционно-химическая добавка микрокремнезем марки МКУ-95) совместно с базальтовым волокном, за счет дробления макропор под действием ПАВ («MasterGlenium 115») уменьшается развитие капиллярных трещин, развивается микропористость с размерами пор 0,1 мкм, то есть близкая к контракционной, что согласуется с выводами работ [1-3,21-22].

Результаты испытаний на морозостойкость исследуемых бетонов приведены в таблице 6 и на рисунке 1.

Таблица 6 - Результаты испытания бетонов на морозостойкость

№ Состава	Модификатор, % от массы цемента для микрокремнезема и % от объема для волокна	Потеря массы образца, %, после циклов						К _{мрз} после циклов					
		200	300	400	500	550	600	200	300	400	500	550	600
1	Контрольный, без модификаторов	0,9	1,7	3,2	-	-	-	1,02	0,98	0,91	-	-	-
2	МКУ-95 15%	0,5	1,1	2,0	3,4	5,3	-	1,05	1,01	0,97	0,90	0,71	-
3	Активированный МКУ-95 15%	0,4	0,9	1,6	2,8	4,9	-	1,06	1,02	0,99	0,93	0,78	-
4	Активированный МКУ-95 15%; Полипропиленовая фибра 0,75%	0,2	0,5	1,1	1,9	2,5	3,3	1,09	1,06	1,01	0,97	0,91	0,87
5	Активированный МКУ-95 15%; Базальтовое волокно 0,75%	0,1	0,3	0,5	1,2	1,6	1,9	1,11	1,08	1,04	1,0	0,96	0,92

К_{мрз} – отношение показателя прочности образца после испытания его морозостойкости к прочности образца материала в водонасыщенном состоянии до определения морозостойкости.

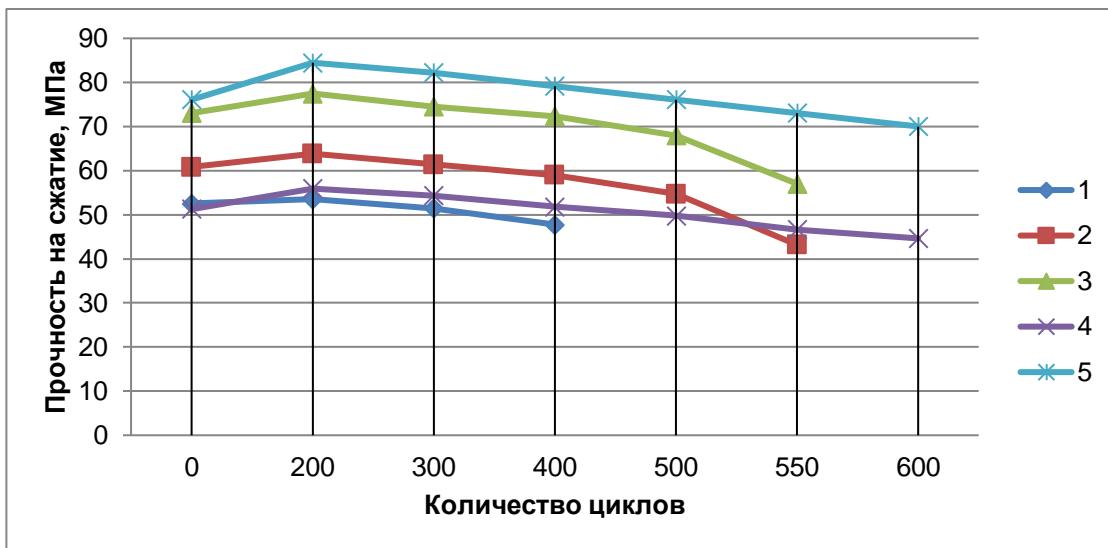


Рисунок 1 - Графическая интерпретация результатов испытаний образцов тяжелого бетона на морозостойкость:

1 – контрольный состав; 2 – МКУ -95, расходом 15%; 3 – активированный МКУ -95, расходом 15%; 4 – активированный МКУ-95, расходом 15%, полипропиленовая фибра, расходом 0,75%; 5 – активированный МКУ-95, расходом 15%; базальтовое волокно, расходом 0,75%

Анализ данных по морозостойкости позволил сделать следующие выводы:

- полученные результаты испытаний контрольного (состава 1) бетона показали, что начиная с 350-400 циклов в образцах отмечалось снижение массы до 4% и кубиковой прочности на 10%.
- при циклах равным 550-600 глубина разрушения образцов с полипропиленовым волокном и активированным микрокремнеземом (состав 4) становилась критической, которая понизила прочностные характеристики более чем на 13%, а снижение массы достигает 3,3%.
- высокая морозостойкость (состав 5) с оптимальным расходом активированного микрокремнезема марки МКУ-95 с расходом 15% и базальтового волокна 0,75% характеризуется потерей массы до 1,9% и прочности на 8% при 600 циклах испытания, что обусловлена созданием замкнутой мелкопористой структуры цементного камня и высокой его водонепроницаемостью [22].

Выводы

На основании представленных результатов исследований можно сделать следующее заключение:

1. Экспериментально доказано улучшение гидрофизических свойств модифицированного состав бетона в сравнении с контрольным: водопоглощение – 2%; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость – F600 с потерей массы до 1,9% и прочности на 8%, что обусловлено получением мелкопористой структуры цементного камня с образованием пор до 0,1 мкм.
2. Установлено, что предлагаемое модифицирование комплексной добавкой совместно базальтовым волокном, позволяет получить тяжелый бетон высокого качества с улучшенными гидрофизическими свойствами: водопоглощение, водонепроницаемость и морозостойкость, что дает возможность рекомендовать его для производства строительных изделий и конструкций, работающих в суровых условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lam T.Q.K, Do T.M.D, Ngo V.T, Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers // Magazine of civil engineering. 2020. № 1 (93). С. 27-34.
2. Teramoto A., Maruyama I., Mitani Y. Influence of silica fume additive and temperature history on the volume change of ultra-high-strength cement paste and concrete // Advances in civil engineering materials. 2019. № 3. С. 153-172.
3. Kherraf L., Abdelouheb A., Belachia M., Hebhou H. Effects of the incorporation of combined additions in cement on the properties of concretes // International review of civil engineering. 2018. № 1(9). С. 31-39.
4. Иноzemцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К. Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 3(40). С. 24-34.
5. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Корженко А., Бурянов А.Ф., Пудов И.А., Лушникова А.А. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками // Строительные материалы. 2011. № 2. С.47-51.
6. Zhao Y., Ding P., Ba C., Tang A., Song N., Liu Y., Shi L. Preparation of TiO₂ coated silicate micro-spheres for enhancing the light diffusion property of polycarbonate composites // Displays. 2014. № 4 (35) С. 220-226.
7. Антипов А. А., Аракелян С.М., Кутровская С.В., Кучерик А.О., Ногтев Д.С., Прокошев В.Г. Осаждение металлических наночастиц из коллоидных растворов импульсно-периодическим лазерным излучением // Перспективные материалы. 2011. №10. С. 200-205.
8. Баженов Ю.М., Александрова О.В., Нгуен Д.К., Булгаков Б.И., Ларсен О.А., Гальцева Н.А., Голотенко Д.С. Высокопрочный бетон из материалов Вьетнама // Строительные материалы. 2020. №3. С.32-38.
9. Liu W., Tan H., Ni C., Chen Z., Luo T., Yu L. Effect of silica fume and fly ash on compressive strength and weight loss of high strength concrete material in sulfuric and acetic acid attack // Key engineering materials. 2017. № 748. С.301-310.
10. Luo X., Weng Y., Wang S., Du J., Wang H., Xu C. Superhydrophobic and oleophobic textiles with hierarchical micro-nano structure constructed by sol-gel method // Journal of sol-gel science and technology. 2019. № 3. С. 820-829.
11. Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., Leon, N., Sanchez-Espinosa, E. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete // Construction and Building Materials. 2018. № 165. С. 93-103.
12. Sun X., Gao Z., Cao P., Zhou C. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete // Construction and building materials. 2019. № 202. С. 58-72.
13. Attia K., Elrefai A., Alnahhal W., Rihan Y. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with bfrp and gfrp bars // Composite structures. 2019. № 211. С. 1-12.
14. Afroz M., Patnaikuni I., Venkatesan S. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium // Construction and building materials. 2017. № 154. С.191-203.
15. Хозин В.Г., Красиникова Н.М., Морозов И.М., Хохряков О.В. Оптимизация состава цементного бетона для аэродромных покрытий // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 2 (28). С.166-172.
16. Клюев А.В., Клюев С.В., Нетребенко А.В., Дураченко А.В. Мелкозернистый фибробетон армированный полипропиленовым волокном // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С.67-72.
17. Шулдяков К.В., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Мамаев Н.А. Влияние добавки "микрокремнезем-поликарбоксилатный суперпластификатор" на гидратацию цемента, структуру и свойства цементного камня // Цемент и его применение. 2013. № 2. С. 114-118.
18. Бахир В.М., Атаджанов А.Р., Мамаджанов У.Д., Алексин С.А., Мариампольский Н.А., Наджимитдинов А.Х. Активированные вещества. Некоторые вопросы теории и практики // Изв. АН УзССР. Сер. техн. Наук. 1981. № 5. С. 68-72
19. Бахир В.М., Задорожний Ю.Г., Леонов Б.И., Паничева С.А., Прилуцкий В.И. Электрохимическая активация: универсальный инструмент зеленой химии. М.: Маркетинг Саппорт Сервисиз, 2005. 176 с.
20. Петрушенко И. Ю., Лобышев В. И. Физико-химические свойства водных растворов, полученных в мембранным электролизере // Биофизика. 2004. №1 (49). С. 22 -31.
21. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Изд. Ассоциации строительных вузов, 2006. 368 с.
22. Соловьев В.И., Ткач Е.В., Серова Р.Ф., Ткач С.А., Тоимбаева Б.М., Сейдинова Г.А. Исследование пористости цементного камня, модифицированного комплексными органоминеральными модификаторами // Фундаментальные исследования. 2014. № 8-3. С. 590-595.

REFERENCES

1. Lam T.Q.K, Do T.M.D, Ngo V.T, Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers. *Magazine of civil engineering*. 2020. Vol. 93. No. 1. Pp. 27-34.
2. Teramoto A., Maruyama I., Mitani Y. Influence of silica fume additive and temperature history on the volume change of ultra-high-strength cement paste and concrete. *Advances in civil engineering materials*. 2019. No. 3. Pp. 153-172.
3. Kherraf L., Abdelouhed A., Belachia M., Hebbouh H. Effects of the incorporation of combined additions in cement on the properties of concretes. *International review of civil engineering*. 2018. Vol. 9. No. 1. Pp. 31-39.
4. Inozemtsev A.S., Korolev E.V., Zyong T.K. Reologicheskie osobennosti cementno-mineral'nyh sistem, plastificirovannyh polikarboksilatnym plastifikatorom [Rheological features of cement-mineral systems with a polycarboxylate plasticizer]. *Regional architecture and engineering*. 2019. Vol. 40. No. 3. Pp. 24-34. (rus)
5. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzhenko A., Buryanov A.F., Pudov I.A., Lushnikova A.A. Modifikaciya cementnyh betonov mnogoslojnymi uglerodnymi nanotrubkami [Modification of cement concretes with multilayer carbon nanotubes]. *Stroitel'nye materialy [Construction materials]*. 2011. No. 2. Pp. 47-51. (rus)
6. Zhao Y., Ding P., Ba C., Tang A., Song N., Liu Y., Shi L. Preparation of TiO₂ coated silicate micro-spheres for enhancing the light diffusion property of polycarbonate composites. *Displays*. 2014. Vol. 35. No. 4. Pp. 220-226.
7. Antipov A.A., Arakelyan S.M., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O., Nogtev D.S., Prokoshev V.G. Osazhdennie metallicheskikh nanochastic iz kolloidnyh rastvorov impul'sno-periodicheskim lazernym izlucheniem [Deposition of metal nanoparticles from colloidal solutions by repetitively pulsed laser radiation]. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2011. No. 10. Pp. 200-205. (rus)
8. Bazhenov Yu.M., Alexandrova OV, Nguyen D.K., Bulgakov B.I., Larsen O.A., Galtseva N.A., Golotenko D.S. Vysokoprochnyj beton iz materialov V'etnama [High-performance concrete produced with locally available materials of Vietnam]. *Building materials*. 2020. No. 3. Pp. 32-38. (rus)
9. Liu W., Tan H., Ni C., Chen Z., Luo T., Yu L. Effect of silica fume and fly ash on compressive strength and weight loss of high strength concrete material in sulfuric and acetic acid attack. *Key engineering materials*. 2017. Vol. 748. Pp. 301-310.
10. Luo X., Weng Y., Wang S., Du J., Wang H., Xu C. Superhydrophobic and oleophobic textiles with hierarchical micro-nano structure constructed by sol – gel method. *Journal of sol-gel science and technology*. 2019. No. 3. Pp. 820-829.
11. Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., Leon, N., Sanchez-Espinosa, E. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. No. 165. Pp. 93-103.
12. Sun X., Gao Z., Cao P., Zhou C. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete. *Construction and building materials*. 2019. No. 202. Pp. 58-72.
13. Attia K., Elrefai A., Alnahhal W., Rihan Y. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with bfrp and gfrp bars. *Composite structures*. 2019. No. 211. Pp. 1-12.
14. Afroz M., Patnaikuni I., Venkatesan S. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium. *Construction and building materials*. 2017. Vol. 154. Pp. 191-203.
15. Khozin V.G., Krasnikova N.M., Morozov I.M., Khokhryakov O.V. Optimizaciya sostava cementnogo betona dlya aerodromnyh pokrytij [Optimization of composition of cement concrete for airfield coverings]. *News of the KSUAE*. 2014. Vol. 28. No. 2. Pp. 166-172. (rus)
16. Klyuev A.V., Klyuev S.V., Netrebenko A.V., Durachenko A.V. Melkozernistyj fibrobeton armirovannyj polipropilenovym voloknom [Fine-grained fiber-reinforced concrete reinforced with polypropylene fiber]. *Vestnik belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova]*. 2014. No. 4. Pp. 67-72. (rus)
17. Shuldyakov K.V., Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Mamaev N.A. Vliyanie dobavki "mikrokremnezem-polikarboksilatnyj superplastifikator" na gidrataciyu cementa, strukturu i svojstva cementnogo kamnya [Influence of the polycarboxylate superplasticizer - microsilica additive on the hydration, structure and properties of cement]. *Cement i ego primenenie [Cement and its application]*. 2013. No. 2. Pp. 114-118. (rus)
18. Bakhir V.M., Atadzhanyov A.R., Mamadzhanyov U.D., Alekhin S.A., Mariampolsky N.A., Nadzhimtdinov A.Kh. Aktivirovannye veshchestva. Nekotorye voprosy teorii i praktiki [Activated substances. Some questions of theory and practice]. *Izvestiya AN UzSSR. Ser. tekhn. Nauk [News of the Academy of Sciences of the UzSSR. Ser. tech. Science]*. 1981. No. 5. Pp. 68-72. (rus)
19. Bakhir V.M., Zadorozhny Yu.G., Leonov B.I., Panicheva S.A., Prilutsky V.I. Elektrohimicheskaya aktivaciya: universal'nyj instrument zelenoj himii [Electrochemical activation: a versatile tool for green chemistry]. Moscow: Marketing Support Services Publ., 2005. 176 p. (rus)

20. Petrushanko I. Yu., Lobyshev V.I. Fiziko-himicheskie svojstva vodnyh rastvorov, poluchennyh v membrannom elektrolizere [Physical and chemical properties of aqueous solutions obtained in a membrane electrolyzer]. *Biophysics*. 2004. Vol. 49. No. 1. Pp. 22 -31. (rus)
21. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modificirovannye vysokokachestvennye betony [Modified high quality concrete]. Moscow: Association of building universities Publ., 2006. 368 p. (rus)
22. Soloviev V.I., Tkach E.V., Serova R.F., Tkach S.A., Toimbaeva B.M., Seydinova G.A. Issledovanie poristosti cementnogo kamnya, modificirovannogo kompleksnymi organomineral'nymi modifikatorami [Research of cement stone porosity modified by complex organic mineral modifiers]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. 2014. No. 8-3. Pp. 590-595. (rus)

Информация об авторах:

Ткач Евгения Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов и материаловедения.
E-mail: ev_tkach@mail.ru

Темирканов Руслан Ильясович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
аспирант кафедры строительных материалов и материаловедения.
E-mail: profit288@gmail.com

Ружило Ольга Владимировна

ООО «Холсим (Рус) СМ», Москва, Россия
технический эксперт.
E-mail: ousacheva1992@gmail.com

Information about authors:**Tkach Evgeniya V.**

National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia,
doctor of technical sciences, professor, professor of the department of building materials and materials science.
E-mail: ev_tkach@mail.ru

Temirkanov Ruslan I.

National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia,
postgraduate student of the department of building materials and materials science.
E-mail: profit288@gmail.com

Ruzhilo Olga V.

LafargeHolcim (Russia), Moscow, Russia,
technical expert.
E-mail: ousacheva1992@gmail.com