

Е.В. ТКАЧ¹, Р.И. ТЕМИРКАНОВ¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

УЛУЧШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОГО МИКРОКРЕМНЕЗЕМА С МИКРОАРМИРУЮЩИМ ВОЛОКНОМ

Аннотация. Целью данной работы является исследование поведения активированного микрокремнезема в щелочной среде и влияние волокон (фибры) на физико-механические характеристики бетона. Предложен метод активации микрокремнезема в щелочной среде и стабилизации тонкодисперсных частиц суперпластификатором. Для проведения сравнительного анализа результатов, в разработанные составы бетонных смесей вводилось микроволокно в виде базальтовой и полипропиленовой фибры с расходом от 0,5 до 1% по объему. Испытание образцов-призм исследуемых составов бетона проводилось с рекомендованной интенсивностью нагружения, фиксацией и обработкой результатов исследования. Установлено, что образцы-призмы из тяжелого бетона с базальтовой фиброй (БФ 0,75%) выдерживают максимальную нагрузку и имеют условный коэффициент интенсивности напряжений выше на – 25,91%, напряжение при изгибе – 25,89% в сравнении с контрольным составом. По отношению к образцам с полипропиленовой фиброй (ПП 0,75%) на 10,85% и 10,87% соответственно. Полученные результаты исследований модифицированного бетона на основе применения химически активированного микрокремнезема с микроармирующим волокном, обладающего улучшенными физико-механическими свойствами и эксплуатационными показателями, позволяют рекомендовать его для строительства изделий и конструкций в тяжелых условиях эксплуатации.

Ключевые слова: активированный микрокремнезем, микроармирующее волокно, органоминеральная добавка, модифицированный бетон, трещиностойкость, деформативные характеристики, эксплуатационные показатели.

E.V. TKACH¹, R.I. TEMIRKANOV¹¹National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia

IMPROVING THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF MODIFIED CONCRETE BASED ON THE USE OF CHEMICALLY ACTIVATED MICRO-SILICA WITH MICRO-REINFORCING FIBER

Abstract. The purpose of this work is to study the behavior of activated microsilica in an alkaline environment and the effect of fibers (fibers) on the physical and mechanical characteristics of concrete. The method of microsilica activation in an alkaline medium and stabilization of fine particles by superplasticizer is proposed. For the comparative analysis of the results, in the developed compositions of concrete mixtures were introduced micro-fiber in the form of basalt and polypropylene fiber with consumption from 0.5 to 1% by volume. Testing of specimen prisms of the studied concrete mixtures was carried out with the recommended intensity of loading, fixation and processing of the results. It is established that the samples-prisms of heavy concrete with basalt fiber (BF 0.75%) withstand the maximum load and have a conventional stress intensity factor higher by - 25.91%, bending stress - 25.89% in comparison with the control composition. In relation to samples with polypropylene fibre (PP 0.75%) by 10.85% and 10.87% respectively. The received results of researches of the modified concrete on the basis of application of chemically activated microsilica with microarming fibers possessing the improved physical and mechanical properties and operational indicators, allow recommending it for building of products and designs in heavy conditions of operation.

Keywords: activated silica fume, microreinforcing fiber, organomineral additive, modified concrete, crack resistance, deformation characteristics, performance indicators.

1 Введение

Актуальность данной работы связана с повышением трещиностойкости и повышением свойств бетонов и качественных характеристик изделий. Применяя метод инициирования активности минеральных добавок, регулировали процесс модифицирования структуры цементного камня [1-5]. Цель исследования заключается в разработке технологии бетона с повышенными физико-механическими свойствами на основе применения дисперсного армирования волокном и химически активированного микрокремнезема в составе комплексной органоминеральной добавки.

Теоретической основой данной работы стали исследования зарубежных и отечественных специалистов, посвященные вопросам дисперсного армирования цемента и бетона для повышения показателей предела прочности при растяжении и составления корреляционной зависимости прочностных, деформативных свойств бетона от водоцементного отношения и продолжительности твердения [1-5]. В данных работах раскрыт процесс структурообразования и определены методы экспериментальной оценки трещиностойкости, при этом отсутствует сравнительный анализ применения комплекса фибры на различной основе совместно с активированным микрокремнеземом. Особый интерес представляют работы [6-9] в области дисперсного армирования высококачественного бетона, подбора оптимального расхода фибры и методики их испытаний. Основываясь на исследованиях в области коллоидной химии, синтеза кремнийорганических соединений [10-16], можно предположить, что предложенная активация микрокремнезема (МКУ-95) в составе комплексной добавки, является перспективным направлением модифицирования цементного камня. По результатам анализа литературных источников, Анализ исследований и накопленного мирового опыта показал, для тяжелых и мелкозернистых бетонов на цементном вяжущем, эффективной активной минеральной добавкой является микрокремнезем - отход производства кристаллического кремния кремнийсодержащих сплавов, ферросиликохрома, ферросилиция и других. Данная минеральная добавка представлена в виде конденсированных аэрозолей, которые улавливаются фильтрами газоочистки электрических печей. Микрокремнезем представлен в ультрадисперсных частицах сферической формы с удельной поверхностью 18000-25000 см²/г и средним диаметром 0,1 мкм. Содержание диоксида кремния аморфной модификации - 90-93 %. В работах [10-16] экспериментально установлено, что аморфный кремнезем можно перевести в ортокремневую кислоту (H₄SiO₄ или Si(OH)₄). В данной работе химическая активация кремнесодержащего наполнителя заключается в его предварительной выдержке в воде, обработанной методом электролиза.

2 Модели и методы

На этапе исследования и разработке оптимальных составов бетонных смесей применялись материалы: в качестве вяжущего использовали портландцемент производства АО «ЕВРОЦЕМЕНТ групп» марки ЦЕМ I 42,5Н соответствующий требованиям [17,18]. Химический и минеральный состав цемента приведены в таблицах 1 и 2.

Испытания цемента проводили в соответствии со стандартными методами испытаний [19,20]. Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 1 – Химический состав портландцемента

Марка цемента	Завод изготовитель	Химический состав, мас.%						
		Na ₂ O	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	AL ₂ O ₃	SiO ₂
ЦЕМ I 42,5Н	АО «ЕВРОЦЕМЕНТ групп» Воронежская обл.	0,58	0,23	0,77	3,54	63,36	4,89	20,64

Таблица 2 – Минеральный состав клинкера портландцемента

Марка цемента	Содержание минералов в клинкере, %			
	C ₄ AF	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S
ЦЕМ I 42,5Н	10,76	6,98	11,49	60,87

По результатам испытаний, цемент соответствует требованиям стандарта [17].

Мелким заполнитель представлен песком карьера «Капылиха», расположенный во Владимирской области, пос. Балакирево.

Таблица 3 – Результаты испытаний портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н

Показатель	Фактические значения	Знач. по ГОСТ 31108-2016
Остаток на сите 45 мкм, %	3,1	-
Остаток на сите 80 мкм, %	0,5	-
Нормальная густота, %	28	-
Удельная поверхность (по Блейну), см ² /г	3500	-
Тест на равномерность изменения объема (Кольцо Ле-Шателье)	Выдерживает	Выдерживает
Начало схватывания, мин	190	Не ранее 60
Прочность при сжатии в возрасте 28 сут., МПа	57,7	Не менее 42,5
Прочность при сжатии в возрасте 2 сут., МПа	24,4	Не менее 10
Истинная плотность, кг/м ³	3150	-
Насыпная плотность, кг/м ³	1250	-

Методами стандарта [21] определяли свойства песка, в таблице 4 представлены результаты испытаний.

Таблица 4 – Результаты испытаний песка

Производитель	Характеристика песка				
	Истинная плотность, кг/м ³	Модуль крупности	Насыпная плотность, кг/м	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	Содержание глинистых и пылевидных частиц, %
ООО «Агат», Владимирская обл.	2620	2,5	1620	75,2	1,5

В соответствии с требованиями [22], полученные результаты, представленные в таблице 4 по содержанию пылевидных и глинистых примесей, радиационно-гигиенической оценке и гранулометрическому составу, данный песок полностью удовлетворяет требования стандарта [22]. Данный материал относится к 1 классу радиоактивности ($A_{эфф}$ менее 370 Бк/кг согласно требованиям [23]), что подтверждает радиационно-гигиеническая оценка.

Крупный заполнитель представлен в виде гранитного щебня фракции от 5 до 20мм, производства ООО «ДорНерудРесурс» г. Саратов, соответствующий требованиям [24]. Вода затворения соответствует требованиям межгосударственного стандарта [25]. В качестве пластифицирующей добавки применялся суперпластификатор «Пластилит РК», производства ООО «НПО СИНТЕЗ». Данная добавка соответствует требованиям [26] для пластифицирующих и водоредуцирующих добавок.

В качестве реакционно-химической добавки использовали микрокремнезем (МКУ-95) производства ООО "РУСАЛ Кремний Урал" с размером частиц 5-50 мкм. Качественные характеристики микрокремнезема МКУ-95 представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристика МКУ-95

Наименование показателей	Качественные характеристики МКУ-95
Массовая доля диоксида кремния, %, не менее (SiO_2)	96,66
Массовая доля оксида фосфора (P_2O_5), %, не более	0,09
Массовая доля оксида магния (MgO), %, не более	0,5
Массовая доля оксида алюминия (Al_2O_3), %, не более	0,15
Массовая доля оксида железа (Fe_2O_3), %, не более	0,20
Массовая доля серного ангидрида (SO_3), %, не более	0,43
Массовая доля оксида кальция (CaO), %, не более	0,38
Массовая доля свободных щелочей (Na_2O, K_2O), %, не более	1,60
Массовая доля воды, %, не более	0,27

В качестве микроармирующего компонента применяли рубленное базальтовое волокно и полипропиленовую фибру производства ООО «ИнРес», характеристики которых приведены в таблице 6.

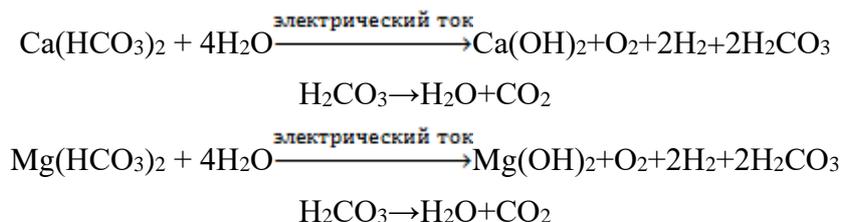
Таблица 6 – Физико-механические характеристики рубленного базальтового волокна и полипропиленовой фибры

Показатель	Характеристики	
	Базальтовое волокно	Фибра полипропиленовая
Температура плавления, °С	1450	160
Длина отрезка, мм	12,67	12
Стойкость к щелочам и коррозии	Высокая	Низкая
Диаметр элементарного волокна, мкм	16,19	60
Удлинение при разрыве, %	1,4-3,6	23-35
Прочность на растяжение, R, МПа·10 ³	2,8-3,4	0,57
Плотность, г/см ³	2,63	0,91
Модуль упругости F _r , МПа·10 ³	100-130	3,5

В данной работе исследовали процесс физико-химической активации микрокремнезема, основанный на обработке воды затворения методом электролиза с помощью прибора «Мелеста» (производитель ООО МВП) для получения католита-анолита.

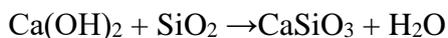
Электрический ток пропускали через водопроводную воду, в которой преимущественно содержатся гидрокарбонаты кальция и магния, таким образом в результате гидролиза воды получили гидроксиды кальция и магния и диоксид углерода.

Суммарное уравнение электролиза водопроводной воды имеет вид:



После обработки водопроводной воды методом электролиза образуется малорастворимый Ca(OH)₂, нерастворимый Mg(OH)₂ и слабая угольная кислота, которая сразу же распадается на диоксид углерода и воду. В результате исследований pH воды, обработанной методом электролиза, составил 10. Следовательно, после обработки электрическим током в водопроводной воде преимущественно содержится сильное основание Ca(OH)₂ – источник группы OH⁻, определяющий щелочную среду раствора.

В результате микрокремнезем, введенный в воду, обработанную методом электролиза (pH=10), приобретает повышенную химическую активность за счет щелочного возбуждения по реакции:



Об этом свидетельствует уменьшение pH с 10 до 7,5. Далее происходит гидролиз силиката кальция с образованием гидросиликата кальция и гидроксида кальция:



Это подтверждает увеличение pH среды с 7,5 до 8,1 (через 3 ч) и до 8,7 (через 24 ч).

При введении в систему «электролизная вода – микрокремнезем» стабилизатора pH среды снижается с 7,5 до 6,8. т.к. стабилизатор содержит лигносульфонат натрия, являющийся анионным ПАВ, то часть ионов кальция вступает во взаимодействие с молекулами пластификатора, тем самым снижая pH среды суспензии.

Установлено, что на активных участках микрокремнезема в присутствии пластификатора (несмотря на образование пленки на его поверхности) также происходит образование силиката кальция и его последующая гидратация, о чем свидетельствует изменение значения pH среды: через 3 ч – увеличился с 6,8 до 7,4; через 24 ч – до 8,2.

Таким образом, показано, что при введении в цемент МК, активированного водой, обработанной методом электролиза, и стабилизированного пластификатором, процессы гидролиза и гидратации цементных зерен проходят интенсивнее, что связано с образованием активных центров в виде продуктов гидролиза активированного МК, которые концентрируют вокруг себя новообразования, формируя коллоидную систему.

Для дальнейших исследований и испытаний образцов исследуемого бетона использовались стандартные методы исследований, удовлетворяющие требованиям [27-29]. В экспериментах использовались составы модифицированного бетона, представленные в таблице 7, с активированным микрокремнеземом (15% от массы вяжущего): контрольный (без фибры), составы 1-6 (с расходом фибры базальтовой (БФ) и полипропиленовой (ВСМ) от 0,5 до 1%). С целью определения характеристик трещиностойкости при неравновесных испытаниях в соответствии с требованиями [28] готовились образцы-призмы размером 70×70×280 мм с расходом материалов, представленным в таблице 7.

Для каждого состава готовилось 4 образца с глубиной начального надреза 25 мм и шириной 2 мм в соответствии с требованиями [29]. Характеристики исследуемых образцов-призм из тяжелого бетона для проведения испытания на трещиностойкость представлены в таблице 8.

Таблица 7 – Составы бетонных смесей

п/п	Компоненты	Расход материалов на 1 м ³ , кг						
		Контр.	0,5% БФ	0,75% БФ	1% БФ	0,5% ВСМ	0,75% ВСМ	1% ВСМ
1	ЦЕМ I 42,5Н	357	357	357	357	357	357	357
2	Вода, обработанная методом гидролиза с pH=10-11	147	147	147	147	147	147	147
3	Гранитный щебень	950	950	950	950	950	950	950
4	Песок	845	845	845	845	845	845	845
5	Суперпласти-фикатор «Пластилит РК»	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
6	Микрокремне-зем МКУ-95	63	63	63	63	63	63	63
7	Фибра базальтовая	-	13,7	20,55	27,4	-	-	-
8	Фибра ВСМ	-	-	-	-	4,55	6,825	9,1
9	В/Т (Ц+МК)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

Испытания образцов на трещиностойкость проводились на базе оборудования НИУ МГСУ (рисунок 2), в частности применялась сервогидравлическая система ADVANTEST 9. При проведении испытаний соблюдались следующие требования: относительная влажность воздуха не менее 50%, температура окружающей среды 20±5°С, линейные размеры образцов замеряются с погрешностью не выше 1 мм, их перемещения – 0,01 мм, а усилия, действующие на образец – не более 1% измеряемого максимального усилия. Перед началом испытаний требуется провести два цикла нагружения - разгружения до нагрузки, составляющей 10% ожидаемой максимальной.



Рисунок 2 – Сервогидравлическая установка ADVANTEST 9

Таблица 8 – Характеристики исследуемых образцов-призм для проведения испытания на трещиностойкость

Маркировка образца	№	m, г	b, мм	h, мм	l, мм	ρ , кг/м ³	$\rho_{ср}$, кг/м ³	Толщина в месте надреза, мм
Контрольный	1	3300,8	70	70	280	2405,8	2410,2	45,0
	2	3302,4	70	70	280	2407,0		45,0
	3	3290,1	70	69	280	2432,8		45,0
	4	3286	70	70	280	2395,0		45,0
БФ 0,5%	5	3294,8	70	71	279	2343,1	2378,4	45,0
	6	3293,3	70	70	280	2400,4		45,0
	7	3290,9	70	71	280	2364,8		45,0
	8	3300,1	70	70	280	2405,3		45,0
БФ 0,75%	9	3219,2	70	70	280	2346,4	2339,2	45,0
	10	3227,7	70	71	280	2319,4		45,0
	11	3221,9	70	70	279	2356,7		45,0
	12	3248,3	70	71	280	2334,2		45,0
БФ 1%	13	3247,6	70	70,5	280	2317,4	2367,5	45,0
	14	3309,1	70	71	280	2377,9		45,0
	15	3391,2	71	71	280	2369,2		45,0
	16	3300,4	70	70	280	2405,5		45,0
ПП 0,5%	17	3293,8	70	71	280	2366,9	2366,5	45,0
	18	3241,0	70	71	280	2329,0		45,0
	19	3293,3	69	71	280	2400,9		45,0
	20	3250,6	70	70	280	2369,2		45,0
ПП 0,75%	21	3240	70	70	280	2361,5	2365,8	45,0
	22	3258	70	70	280	2374,6		45,0
	23	3235,4	69	71	280	2358,6		45,0
	24	3249,7	70	70	280	2368,6		45,0
ПП 1%	25	3210,8	70	70	280	2340,2	2352,1	45,0
	26	3268,3	70	70,5	280	2365,2		45,0
	27	3200,7	70	70	279	2341,2		45,0
	28	3240	70	70	280	2361,5		45,0

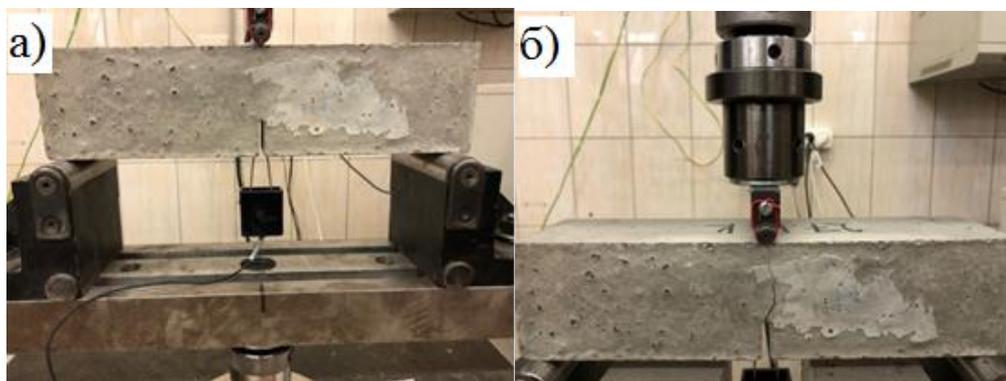


Рисунок 3 – Нагружение образца-призмы из тяжелого бетона:
а – образец до нагружения перед испытанием; б – после нагружения

Образец перед началом испытания представлен на рисунке 3(а). Скорость нагружения образцов устанавливали по скорости перемещения нагружающей плиты прессы в пределах 0,02-0,2 мм/с; при этом время испытаний составило не менее 1 мин (рисунок 3 б).

При неравновесных испытаниях образцы нагружали непрерывно вплоть до их разделения на части с фиксацией значения нагрузки F_c^* , соответствующей динамическому началу движения магистральной трещины.

3 Результаты исследования и их анализ

Испытание на трещиностойкость модифицированного бетона на основе применения химически активированного микрокремнезема и микроармирующего волокна проводилось в соответствии с требованиями [29]. Полученные результаты испытаний отображены в таблице 9, а графики нагружения на рисунках 6-8.

Таблица 9 – Результаты испытаний на трещиностойкость модифицированного бетона на основе применения химически активированного микрокремнезема с микроармирующим волокном

Маркировка образца	№/№	Нагрузка, кН	Напряжение, МПа	Нагрузка, кН (ср.)	Напряжение, МПа (ср.)
Контрольный	1	2,327	6,403	2,229	6,132
	2	2,110	5,806		
	3	2,178	5,991		
	4	2,299	6,326		
БФ 0,5%	5	2,522	6,939	2,564	7,047
	6	2,467	6,763		
	7	2,660	7,318		
	8	2,605	7,167		
БФ 0,75%	9	2,930	8,061	2,847	7,826
	10	2,789	7,646		
	11	2,911	8,009		
	12	2,758	7,588		
БФ 1%	13	2,676	7,362	2,593	7,135
	14	2,509	6,903		
	15	2,611	7,183		
	16	2,577	7,090		
ПП 0,5%	17	2,521	6,935	2,418	6,651
	18	2,409	6,627		
	19	2,335	6,424		
	20	2,405	6,616		
ПП 0,75%	21	2,643	7,271	2,517	6,923
	22	2,378	6,542		
	23	2,441	6,715		
	24	2,604	7,164		
ПП 1%	25	2,302	6,333	2,399	6,600
	26	2,504	6,888		
	27	2,389	6,572		
	28	2,401	6,605		

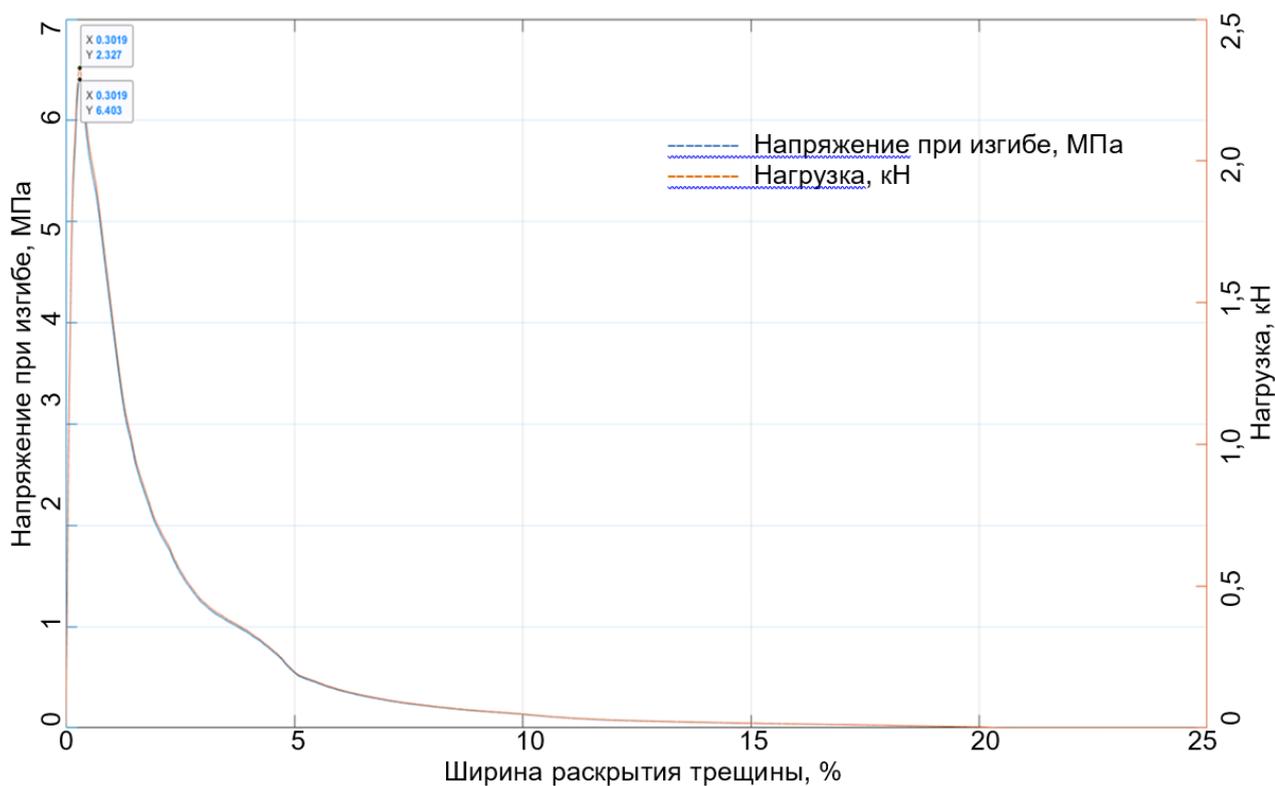


Рисунок 6 – График нагружения контрольного образца-призмы из тяжелого бетона (без армирующего волокна)

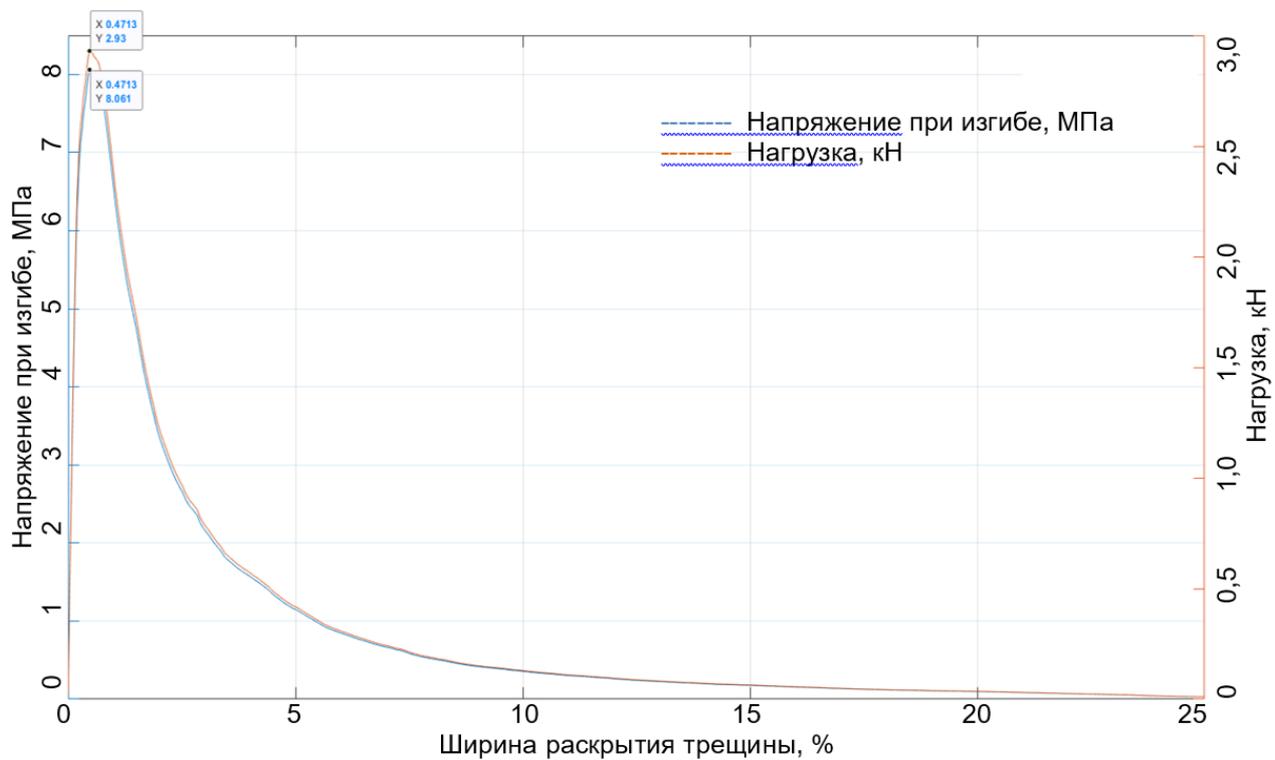


Рисунок 7 – График нагружения образца-призмы из тяжелого бетона с базальтовой фиброй БФ 0,75%

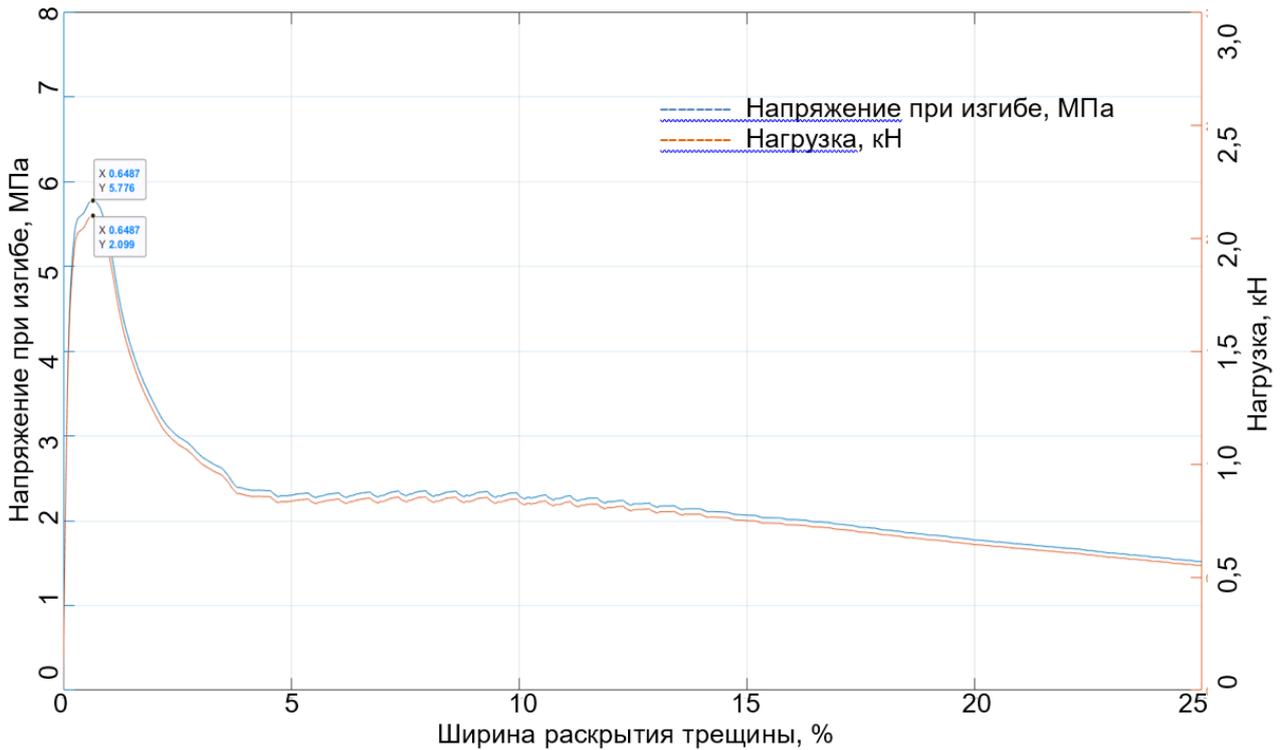


Рисунок 8 – График нагружения образца-призмы из тяжелого бетона с полипропиленовой фиброй ПП 0,75%

В результате исследований образцов-призм из тяжелого бетона на трещиностойкость установлено, что бетон с базальтовым волокном (БФ 0,75%) показал повышенную способность сопротивлению приложенной нагрузки. Это объясняется тем, повысилось сцепление с цементно-песчаной матрицей, введенных в бетонную смесь базальтовых волокон. Значительное повышение трещиностойкости образцов, можно связать с макроармирующей способностью фибровых волокон и релаксацией напряжений на поверхностях контакта «матрица - наполнитель».

Характеристику трещиностойкости по результатам неравновесных испытаний образцов типа 1 определяют решением зависимости, в соответствии с [29]:

$$K_c^* = \frac{3F_c^* L_0}{2b^{1/2} t} \sqrt{a_0/b} (1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4), \quad (1)$$

где K_c - критический коэффициент интенсивности напряжений при максимальной нагрузке, [МПа·м]

F_c^* - нагрузка, соответствующая динамическому началу движения магистральной трещины при неравновесных испытаниях, [МН]

K_c^* - условный коэффициент интенсивности напряжений.

$\lambda = a_0/b$ - относительная длина начального надреза

b, t, L_0, L, D - размеры образца, [м]

a_0 - длина начального надреза, [м]

Для контрольного образца устанавливаем следующие значения:

$F_c^* = 0,002327$ МН, $L_0 = 0,266$ м, $b = 0,07$ м, $t = 0,07$ м, $a_0 = 0,025$ м, $\lambda = 0,357143$

следовательно, уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{3 \cdot 0,002327 \cdot 0,266}{2 \cdot 0,07^{1/2} \cdot 0,07} \cdot \sqrt{\frac{0,025}{0,07}} \cdot (1,93 - 3,07 \cdot 0,357143 + 14,53 \cdot 0,357143^2 -$$

$$-25,11 \cdot 0,357143^3 + 25,8 \cdot 0,357143^4) = 0,058807 \text{ МПа} \cdot \text{м}.$$

Для образца-призмы из тяжелого бетона с базальтовой фиброй (БФ 0,75%) нагрузка, соответствующая динамическому началу движения магистральной трещины при неравновесных испытаниях $F_c^* = 0,008061 \text{ МН}$; подставляем данное значение в уравнение (8) и находим условный коэффициент интенсивности напряжений $K_c^* = 0,074044 \text{ МПа} \cdot \text{м}$. Аналогично, для образца-призмы из тяжелого бетона с полипропиленовой фиброй (ПП 0,75%) и $F_c^* = 0,007546 \text{ МН}$ находим $K_c^* = 0,069318 \text{ МПа} \cdot \text{м}$.

В таблице 10 представлены прочностные и деформативные характеристики исследуемых образцов-призм модифицированного бетона.

Таблица 10 – Прочностные и деформативные характеристики исследуемых образцов-призм модифицированного бетона

Вид и маркировка образца	Нагрузка (max), кН	Напряжение при изгибе (max), Мпа	Условный коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м
Контрольный	2,327	6,403	0,05881
БФ 0,75%	2,93	8,061	0,07404
ПП 0,75%	2,643	7,271	0,06679

Анализ результатов таблицы 10 показал, что максимальная нагрузка и условный коэффициент интенсивности напряжений образцов-призм бетона с базальтовой фиброй (БФ 0,75%) по отношению к контрольному образцу возросла на 25,91%; напряжение при изгибе на 25,89%. По отношению к образцам с полипропиленовой фиброй (ПП 0,75%) на 10,85% и 10,87% соответственно.

4 Выводы

На основании представленных результатов исследований можно сделать следующее заключение:

1. Установлено, что предлагаемая комплексная добавка в виде микрокремнезема, активированного водой, обработанной методом электролиза, стабилизированного пластификатором «Пластилит РК» и базальтового волокна, позволяет получить тяжелый бетон повышенного качества с высокими прочностными и деформативными характеристиками, что дает возможность производства конструкций и изделий с улучшенными характеристиками.

2. Выявлен характер разрушения и образование магистральной трещины с одновременным определением физико-механических характеристик модифицированного бетона с базальтовой фиброй (БФ 0,75%), которые по своим показателям значительно превосходят контрольный (без фибры) и с полипропиленовым волокном. Наблюдается возрастание максимальной нагрузки и условного коэффициента интенсивности напряжений на образцы-призмы с базальтовой фиброй (БФ 0,75%) на 25,91% по отношению к контрольному составу; напряжение при изгибе на 25,89%. Аналогичный характер повышения указанных показателей на 10,85% и 10,87% соответственно по отношению к образцам с полипропиленовой фиброй (ПП 0,75%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнова О.М., Харитонов А.М. Прочностные и деформативные свойства фибробетона с макрофиброй на основе полиолефинов // Строительные материалы. 2018. №12. С.44-49.
2. 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.
3. Xue Q., Zhang J., He J., Ta J., Ramze E. Experimental study of fracture properties for basalt-fiber-reinforced concrete // Harbin Gongcheng Daxue Xuebao. 2016. №8. С. 1027-1033.
4. Afroz M., Patnaikuni I., Venkatesan S. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium // Construction and building materials. 2017. Vol.154. С.191-203.
5. Окольников Г.Э., Новиков Н.В., Старчевская А.Ю., Пронин Г.С. Влияние базальтовой фибры на прочность бетона // Системные технологии. 2019. №2 (31). С.37-40.

6. Zorla E., Ipbuker C., Tkaczyk A.H., Kovaljov S., Kiisa M., Biland A., Gulik V. Optimization of basalt fiber in concrete composite for industrial application in Estonia // *Fresenius environmental bulletin*. 2016. №1. С. 355-364.
7. Смирнова О.М., Корпош Р.В. Дисперсное армирование для получения высококачественного бетона // *Вестник науки и образования северо-запада России*. 2017. №4. С. 57-61.
8. Шляхова Е.И., Левчук Н.В. Применения базальтового волокна в бетонных композиционных системах // *Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона*. 2018. №10. С.170-174.
9. Чиадигхикаоби П.Ч., Эмири Д.А. Базальтовое волокно: устранение трещин в бетоне // *Наука и бизнес: пути развития*. 2018. №11 (89). С.129-132.
10. Шуляков 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.
11. Радциг В.А., Ищенко А.А. Углерод в кремнеземе // *Кинетика и катализ*. 2011. №2. С. 325-339.
12. Билы П., Фладр Й., Хылик Р., Враблик Л., Хрбек В. Влияние процесса замещения цемента и гомогенизации на высокоэффективный бетон // *Инженерно-строительный журнал*. 2019. №2 (86). С. 46-60.
13. Потапов В.В., Горев Д.С. Результаты испытаний экспериментальных составов мелкозернистого бетона с добавлением нанокремнезема и микрокремнезема // *Современные наукоемкие технологии*. 2019. №3-2. С.232-238.
14. 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.
15. Пискнова В.С., Новичков Р.В., Зуев Б.К. Ковалентная и сорбционная иммобилизация органических соединений на кремнеземных микро- и наночастицах и исследование полученных систем методом окситермографии // *Международный студенческий научный вестник*. 2017. №5. С. 131.
16. Логинов С.В, Шелудяков В.Д., Стороженко П.А., Офицеров Е.Н. Аморфный кремнезем опал-кристобалитовых пород как возобновляемое сырье для синтеза кремнийорганических соединений и силикатов. Часть 1. Бесхлорные методы синтеза кремнийорганических соединений. Винилсиланы // *Бутлеровские сообщения*. 2010. №13. С. 1-17.
17. Межгосударственный стандарт ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия».
18. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30515-2013 «Цементы. Общие технические условия».
19. Межгосударственный стандарт ГОСТ 310.1-76 «Цементы. Методы испытаний. Общие положения».
20. Межгосударственный стандарт ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии».
21. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний».
22. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».
23. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов».
24. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия».
25. Межгосударственный стандарт ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».
26. Межгосударственный стандарт ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия».
27. Межгосударственный стандарт ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия».
28. Межгосударственный стандарт ГОСТ 10180-2012 «Методы определения прочности по контрольным образцам».
29. Межгосударственный стандарт ГОСТ 29167-91 «Бетоны. Методы определения характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении».

REFERENCES

1. Smirnova O.M., Haritonov A.M. Prochnostnye i deformativnye svoystva fibrobetona s makrofibroj na osnove poliolefinov [Strength and strain-stress properties of fiber concrete with macro-fiber on the basis of polyolefins] *Stroitel'nye materialy*. 2018. No. 12. Pp. 44-49. (rus)
2. 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.
3. Xue Q., Zhang J., He J., Ta J., Ramze E. Experimental study of fracture properties for basalt-fiber-reinforced concrete. *Harbin Gongcheng Daxue Xuebao*. 2016. No. 8. Pp. 1027-1033.

4. 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.
5. Okol'nikova G.E., Novikov N.V., Starchevskaya A.YU., Pronin G.S. Vliyanie bazal'tovoj fibry na prochnost' betona [Impact of basalt fiber on concrete strength] *Sistemnye tekhnologii*. 2019. No. 2 (31). Pp. 37-40. (rus)
6. Zorla E., Ipbuker C., Tkaczyk A.H., Kovaljov S., Kiisa M., Biland A., Gulik V. Optimization of basalt fiber in concrete composite for industrial application in Estonia. *Fresenius environmental bulletin*. 2016. No. 1. Pp. 355-364.
7. Smirnova O.M., Korposh R.V. Dispersnoe armirovanie dlya polucheniya vysokokachestvennogo betona [Fiber-reinforcement for production of high-performance concrete] *Vestnik nauki i obrazovaniya severo-zapada Rossii*. 2017. No. 4. Pp. 57-61. (rus)
8. SHlyahova E.I., Levchuk N.V. Primeneniya bazal'tovogo volokna v betonnykh kompozitsionnykh sistemah [Application of basalt fiber in composite concrete systems] *Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona*. 2018. No. 10. Pp. 170-174. (rus)
9. CHiadighikaobi P.CH., Emiri D.A. Bazal'tovoe volokno: ustranenie treshchin v betone [Basalt chopped fiber: a solution to cracks in concrete] *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2018. No. 11 (89). Pp. 129-132. (rus)
10. SHuldyakov K.V., Kramar L.YA., Trofimov B.YA., Mamaev N.A. Vliyanie dobavki "mikrokremnezem-polikarboksilatnyj superplastifikator" na gidratatsiyu cementa, strukturu i svoystva cementnogo kamnya [Influence of the polycarboxylate superplasticizer - microsilica additive on the hydration, structure and properties of cement] *Cement i ego primeneniye*. 2013. No. 2. Pp. 114-118. (rus)
11. Radcig V.A., Ishchenko A.A. Uglerod v kremnezeme [Carbon in silica] *Kinetics and catalysis*. 2011. No. 2. Pp. 325-339. (rus)
12. Bily P., Fladr J., Chylik R., Vrablik L., Hrbek V. Vliyanie processa zameshcheniya cementa i gomogenizatsii na vysokoeffektivnyj beton [The effect of cement replacement and homogenization procedure on concrete mechanical properties] *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. 2019. No. 2 (86). Pp. 46-60. (rus)
13. Potapov V.V., Gorev D.S. Rezul'taty ispytaniy eksperimental'nykh sostavov melkozernistogo betona s dobavleniem nanokremnezema i mikrokremnezema [The results of tests of the compositions of fine-grained concrete with addition of nanosilica fume and microsilica] *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2019. No. 2 (86). Pp. 46-60. (rus)
14. 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.
15. Pisknova V.S., Novichkov R.V., Zuev B.K. Kovalentnaya i sorbcionnaya immobilizatsiya organicheskikh soedinenij na kremnezemnykh mikro- i nanochastichah i issledovanie poluchennykh sistem metodom oksitermografii [Sorption and covalent immobilization of organic compounds on a silica micro - and nanoparticles and study of the resulting systems by the method of oxythermography] *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik*. 2017. No. 5. Pp. 131. (rus)
16. Loginov S.V., SHeludyakov V.D., Storozhenko P.A., Oficerov E.N. Amorfnyj kremnezem opal-kristobalitovykh porod kak vozobnovlyаемое syr'e dlya sinteza kremnijorganicheskikh soedinenij i silikatov. CHast' 1. Beskhlornye metody sinteza kremnijorganicheskikh soedinenij. Vinilsilany [Amorphous silica opal-cristobalite rocks as renewable raw material for the synthesis of organosilicon compounds and silicates. Part 1. Chlorine-free methods for the synthesis of organosilicon compounds. Vinylsilanes] *Butlerov Communications*. 2010. No. 13. Pp. 1-17. (rus)
17. Interstate Standard GOST 31108-2016 «Common cements. Specifications».
18. Interstate Standard GOST 30515-2013 «Cements. General specifications».
19. Interstate Standard GOST 310.1-76 «Cements. Test methods. General».
20. Interstate Standard GOST 310.4-81 «Cements. Methods of bending and compression strength determination».
21. Interstate Standard GOST 8735-88 «Sand for construction work. Testing methods».
22. Interstate Standard GOST 8736-2014 «Sand for construction works. Specifications».
23. Interstate Standard GOST 30108-94 «Building materials and elements. Determination of specific activity of natural radioactive nuclei».
24. Interstate Standard GOST 8267-93 «Crushed stone and gravel of solid rocks for construction works. Specifications».
25. Interstate Standard GOST 23732-2011 «Water for concrete and mortars. Specifications».
26. Interstate Standard GOST 24211-2008 «Admixtures for concretes and mortars. General specifications».
27. Interstate Standard GOST 7473-2010 «Fresh concrete. Specifications».
28. Interstate Standard GOST 10180-2012 «Concretes. Methods for strength determination using reference specimens».
29. Interstate Standard GOST 29167-91 «Concretes. Methods for determination of fracture toughness characteristics».

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

Information about authors

Tkach Evgeniya V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
doctor in tech. sc., prof., prof. of the dep. of building materials and materials science.
E-mail: ev_tkach@mail.ru

Temirkanov Ruslan I.

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