

УДК 691.328.34:004.925.83

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА,
МОДИФИЦИРОВАННОГО КОМПЛЕКСНЫМ МОДИФИКАТОРОМ
И РАБОТАЮЩЕГО В СУРОВЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ***Е.В. Ткач¹, Ю.С. Филимонова², Д.Р. Янкович¹, В.И. Паевский¹**¹Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (г. Москва)**²Московский политехнический университет (г. Москва)*© Ткач Е.В., Филимонова Ю.С.,
Янкович Д.Р., Паевский В.И., 2024

Аннотация. В статье приведены результаты исследований положительного влияния комплексного модифицирования на свойства тяжелого бетона. Исследование осуществлялось путем уменьшения содержания вяжущего (цемента) и замены его метакаолином, за счет чего повышались гидрофизические характеристики. Отмечено, что положительные результаты исследования дают возможность применять данный состав на практике для получения строительных конструкций с заданными характеристиками, а подобные конструкции могут эксплуатироваться в условиях повышенной нагрузки и агрессивной среды, в частности при строительстве тоннелей.

Ключевые слова: конструкции тоннелей, агрессивные факторы окружающей среды, комплексный модификатор, гидрофизические свойства, суровые условия эксплуатации.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-31-42

ВВЕДЕНИЕ

Тяжелый бетон является ключевым материалом при возведении тоннелей. Он обеспечивает высокую надежность и длительный срок эксплуатации сооружений. Для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик, таких как прочность от 50 МПа и выше, плотность до 2 500 кг/м³, водонепроницаемость W10 и стойкость к агрессивным средам, применяют различные модификаторы, усиливающие структуру и долговечность бетона [1–7]. Одним из важнейших направлений совершенствования бетонных смесей является введение химико-минеральных добавок, которые позволяют улучшить физико-механические показатели бетона и сократить расход ресурсов, что особенно актуально в современных технологических условиях.

В настоящее время существенное внимание уделяется использованию таких активных минеральных добавок [7–12], как микрокремнезем, зола и метакаолин, которые способствуют формированию более плотной и устойчивой структуры бетона. Исследования показывают, что добавление метакаолина в количестве 10–15 % от массы вяжущего улучшает характеристики бетона, а именно ускоряет гидратацию и повышает прочность. В современных разработках внимание также акцентируется на использовании дисперсного армирования различными типами фибры [13–16]. За счет этого дополнительно улучшается структура и усиливается прочность бетона, он становится более устойчивым к механическим нагрузкам и износу.

Совместное использование активных минеральных добавок и суперпластификаторов представляет большой научный интерес, так как оно позволяет заметно улучшить свойства тяжелого бетона. Данный подход к модификации состава способствует увеличению прочности бетона при сжатии до 150 МПа, а также повышению его водонепроницаемости и стойкости к образованию трещин.

Таким образом, улучшение качественных характеристик тяжелого бетона остается актуальной задачей, требующей решения с учетом современных технологических направлений. Эти направления предполагают совместное использование цементного вяжущего с комплексными модификаторами для обеспечения долговечности и надежности конструкций.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводились в строгом соответствии с общепринятыми стандартными методиками. Образцы подготавливались посерийно при соблюдении всех параметров выдержки и хранения до испытания. Общая схема исследования включала в себя логически взаимосвязанные этапы современного научного метода, в частности концептуальное планирование эксперимента с выделением наиболее важных исследуемых характеристик, определение необходимых свойств исходных компонентов, расчет требуемых дозировок каждого компонента.

Химический и минеральный состав цемента определяли при помощи рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализов. Результаты представлены в табл. 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	0,83	0,6	0,88	3,9	64,1	5,89	23,8
	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		6,97		11,5		60,92

Дисперсный состав, технологические и прочностные характеристики цемента определяли с помощью ситового анализа, пикнометрического метода, определения прочности на изгиб и сжатие в соответствии со стандартными методиками. Для определения механической прочности изготавливали образцы-балочки размером 4 × 4 × 16 см из цементно-песчаного раствора с водоцементным отношением В/Ц = 0,4. После изготовления образцы в формах содержали 1 сут в ванне с гидравлическим затвором, в которой обеспечивался следующий режим: относительная влажность воздуха – не менее 90 %, температура среды – 20 ± 2 °С. Через сутки образцы расформовывали и затем 27 сут хранили в ванне с водой, температуру которой контролировали в пределах 20 ± 2 °С. По истечении срока хранения образцы-балочки вынимали из ванны и не позднее чем через 30 мин испытывали на прочность. Полученные результаты приведены в табл. 2. Было установлено, что цемент соответствует требованиям стандарта по

нормируемым показателям: тесту на равномерность изменения объема, началу схватывания цементного теста, прочности при сжатии через 2 и 28 сут.

Таблица 2

Результаты определения характеристик портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н

Показатель	Требование ГОСТ 31108-2020	Фактическое значение
Остаток на сите 45 мкм, %	–	3,15
Остаток на сите 80 мкм, %	–	0,45
Нормальная плотность цементного теста, %	–	26,0
Тест на равномерность изменения объема (кольцо Ле-Шателье), расширение, мм	10	8
Удельная поверхность (по Блейну), см ² /г	–	3 540
Начало схватывания, мин	Не ранее 60	168
Конец схватывания, мин	–	542
Наличие признаков ложного схватывания, да/нет	Нет	Нет
Средняя прочность на сжатие в возрасте 2 сут, МПа	Не менее 10	23,0
Средняя прочность на сжатие в возрасте 28 сут, МПа	Не менее 42,5	46,8
	Не более 62,5	
Истинная плотность, кг/м ³	–	3 162
Насыпная плотность, кг/м ³	–	1 256

В качестве мелкого заполнителя использовали природный песок с модулем крупности 2,5 и размером частиц от 0,16 до 2,5 мм производства ООО «Агат» (Александровский район Владимирской области).

В качестве крупного заполнителя применяли гранитный щебень производства ООО «ДорНерудРесурс» (г. Саратов), соответствующий установленным требованиям: содержание зерен пластинчатой и игловатой формы составляло 11,0 %; содержание пылевидных, илистых и глинистых частиц – 0,8 %; марка щебня по дробимости – 1 400; марка щебня по морозостойкости – 300; насыпная плотность – 1 420 кг/м³; удельная эффективная активность радионуклидов ($A_{эфф}$) – 92 Бк/кг; марка щебня по истираемости – И-1. Максимум в распределении щебня по размерам приходился на 20 мм. Исследованный заполнитель относится к среднезернистому типу кристаллической структуры. Для затворения бетонной смеси использовалась вода. Она не содержала сульфатов более 2 700 мг/л (в пересчете на SO₄), всех солей более 5 000 мг/л, нефтяного шлама и накипи, а содержание органических веществ было менее 15 мг/л, pH – 7,8, цвет отсутствовал.

В качестве пластифицирующей добавки использовалась добавка-суперпластификатор Sunbo PC-1021 производства Sunbo (Китай), расход которой составлял 0,4 % от массы вяжущего вещества.

В качестве водорастворимой полимерной добавки использовали добавку «Полидон-А» производства ООО «Оргполимерсинтез» (г. Санкт-Петербург), соответствующую требованиям ТУ 9365-002-46270704-2001. Расход данной добавки составлял 0,3 % от массы вяжущего. «Полидон-А» – это водный раствор поливинилпирролидона

C_6H_9NO плотностью $1\,200\text{ кг/м}^3$, вязкостью от $3\,000$ до $6\,000\text{ МПа} \cdot \text{с}$ при $25\text{ }^\circ\text{C}$, температурой плавления $150\text{--}180\text{ }^\circ\text{C}$.

В качестве активной минеральной добавки применялся метакаолин марки ВМК-45. Он произведен ООО «Синерго» (Челябинская обл., пос. Желтинский, ул. Степная).

Для дисперсного армирования бетонного камня был выбран волластонит, который представляет собой минерал из класса силикатов, природный силикат кальция подкласса пироксеноидов группы цепочечных силикатов с формулой $Ca[SiO_2]$. Цвет волластонита белый или белый с сероватым либо буроватым оттенком. Волластонит, в зависимости от длины волокон, делится на длинно- и коротковолокнистый, обладающий микроармирующим эффектом.

В табл. 3 приведены составы тяжелого бетона, на которых проводились дальнейшие исследования.

Таблица 3

Исследуемые составы модифицированного тяжелого бетона

Материалы	Расход на 1 м^3 бетонной смеси, кг/м^3 , составы бетона				
	1, контр.	2	3	4	5
ЦЕМ I 42,5Н	365	365	365	321	321
Метакаолин ВМК-45 (12 %)	–	–	–	44	44
Вода	182	182	182	182	182
Щебень	987	987	987	987	987
Песок	756	756	756	756	756
Суперпластификатор Sunbo PC-1021 (0,4 %)		1,46	1,46	1,46	1,46
Полидон-А (0,3 %)	–	–	1,09	1,09	1,09
Волластонит (2 %)	–	–	–	–	7,3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Для установления эффективности взаимодействия воды с матрицей разработанного бетона и, как следствие, эффективности диффузионных процессов внутри матрицы, влияющих на разрушение структуры бетонного камня, проводилось определение пористости бетона, его водопоглощения и водонепроницаемости. Для определения водопоглощения был применен метод последовательного насыщения образцов водой до постоянной массы согласно ГОСТ 12730.3-2020 «Бетоны. Метод определения водопоглощения». Использованные образцы-кубы имели ребро длиной 100 мм , изготавливались из бетонных смесей разработанных составов. Образцы твердели в нормальных условиях на протяжении 28 сут. Серия образцов для испытания включала 3 куба, а также контрольный для каждого из составов. Водопоглощение серии образцов каждого состава определялось как среднее арифметическое значений водопоглощений каждого образца серии. Пористость образцов разработанных составов находилась путем оценки кинетики водопоглощения методом дискретного взвешивания в соответствии с ГОСТ 12730.4-2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости». Образцы-кубы имели ребро длиной 70 мм , серии испытаний включали два образца каждого состава. Значение пористости рассчитывалось как среднее арифметическое. Водонепроницаемость

разработанных бетонных изделий устанавливалась при помощи метода «мокрого пятна» согласно требованиям ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости». Для определения водонепроницаемости из разработанных составов изготавливались образцы-цилиндры диаметром 150 мм и высотой также 150 мм. Было подготовлено по 6 образцов каждого состава в серии. Образцы до испытания выдерживались в камере нормального твердения в нормальных условиях в течение суток. Определение водонепроницаемости проводилось при помощи установки Form+Test WE 6 MMZ (Германия). Образцы устанавливались в посадочные устройства установки, манжеты которой предварительно смазывались водонепроницаемой смазкой. Давление воды поднималось ступенчато с последующей выдержкой (0,2 МПа в течение 1–5 мин) и длительностью воздействия воды под давлением, равной 12 ч на каждой ступени. При появлении «мокрого пятна», равно как и иных признаков проникновения воды в различные места образца, испытание прекращалось. Значение максимального давления воды, при котором не менее чем на 4 образцах из 6 не наблюдалась фильтрация воды, было принято показателем водонепроницаемости образца.

Для определения морозостойкости использовался первый базовый метод. Образцы для испытания представляли собой серию бетонных кубиков с ребром длиной 100 мм, 6 из которых были приняты в качестве контрольных, а 12 имели в составе введенные добавки в соответствии с разработанным планом эксперимента. Время выдержки образцов составило 24 ч при погружении на 1/3 высоты образцов, 24 ч при погружении на 2/3 высоты образцов и 48 ч при полном погружении. Испытание продолжалось до появления структурных дефектов образцов (трещин, сколов и шелушения), потери массы и прочности образцов более чем на 5 % от требуемого значения.

Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость бетона представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость

Маркировка образца	Плотность, кг/м ³ / пористость, %	Водопоглощение по массе, %	Водонепроницаемость, МПа	Марка бетона по водонепроницаемости
Состав 1, контрольный	2 290 / 12,2	4,6	0,6	W6
Состав 2 ПЦ + 0,4 % Sunbo PC-1021	2 292 / 11,3	3,2	0,8	W8
Состав 3 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + + 0,3 % Полидон-А)	2 293 / 10,3	2,2	1,2	W12
Состав 4 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + + 0,3 % Полидон-А + + 12 % ВМК-45)	2 293 / 10,1	1,9	1,4	W14

Окончание табл. 4

Маркировка образца	Плотность, кг/м ³ / пористость, %	Водопоглощение по массе, %	Водонепроницаемость, МПа	Марка бетона по водонепроницаемости
Состав 5 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + 0,3 % Полидон-А + 12 % ВМК-45) + 2 % Волластонит	2 300 / 8,7	1,8	1,4	W14

Анализ полученных данных (см. табл. 4) показывает, что введение комплексного модификатора совместно с волластонитом (состав 5) снизило показатель водопоглощения на 57,8 %; на 37,8 % у состава 2; на 48,9 % у состава 3; на 53,3 % у состава 4, если сравнить с контрольным (составом 1). Водонепроницаемость модифицированного бетона в составе 4 повысилась на 4 степени нагружения в сравнении с контрольным составом 1. При этом наличие в составе 5 волластонита не повлияло на его водонепроницаемость.

На следующем этапе исследований определяли морозостойкость, которая зависит от структуры материала. Известно, что наличие открытых пор, доступных для проникновения воды, негативно сказывается на морозостойкости и долговечности строительных материалов [17–20]. Для проведения испытаний на морозостойкость применялся первый базовый метод по требованиям ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости». Результаты испытаний при циклическом попеременном замораживании и оттаивании отображены в табл. 5 и на рис. 1.

Таблица 5

Результаты испытания бетонов
при циклическом попеременном замораживании и оттаивании

Маркировка образца	Потеря массы образца, %, после циклов					K _{мрз} после циклов				
	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600
Состав 1, контрольный	1,19	2,2	4,36	–	–	0,95	0,92	0,68	–	–
Состав 2 ПЦ + 0,4 % Sunbo PC-1021	0,36	1,09	2,1	3,3	4,88	1,02	0,98	0,95	0,87	0,84

Окончание табл. 5

Маркировка образца	Потеря массы образца, %, после циклов					$K_{\text{мрз}}$ после циклов				
	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600
Состав 3 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + + 0,3 % Полидон-А)	0,25	0,99	1,87	3,1	3,9	1,02	1,00	0,97	0,93	0,87
Состав 4 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + + 0,3 % Полидон-А + + 12 % ВМК-45)	0,15	0,97	1,5	1,7	1,82	1,01	1,04	0,93	0,92	0,9
Состав 5 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + + 0,3 % Полидон-А + + 12 % ВМК-45) + + 2 % Волластонит	0,1	0,2	0,38	1,00	1,6	1,09	1,01	0,99	0,98	0,92

Примечание. $K_{\text{мрз}}$ – отношение показателя прочности образца после испытания его морозостойкости к прочности образца материала в водонасыщенном состоянии до определения морозостойкости.

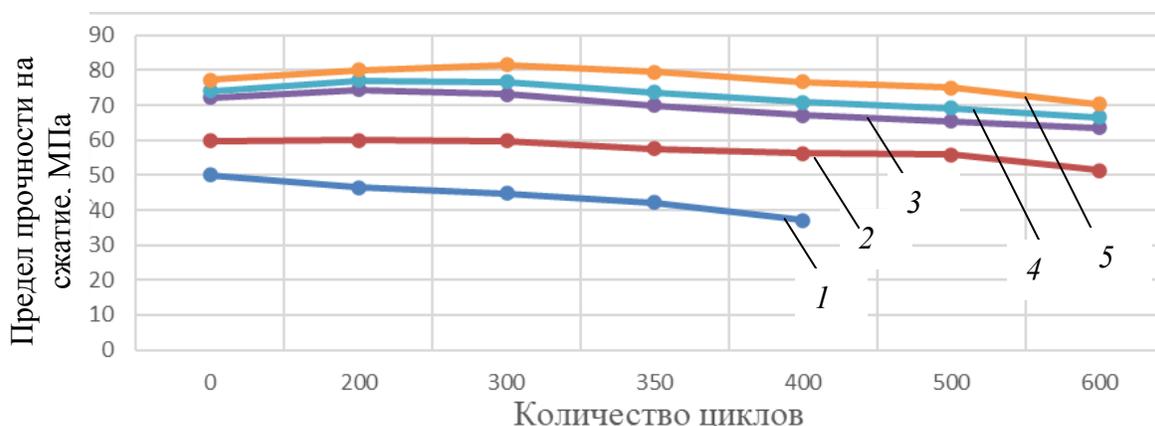


Рис. 1. Графическая интерпретация результатов испытаний образцов тяжелого бетона при циклическом попеременном замораживании и оттаивании: 1–5 – составы 1–5

Результаты испытаний при циклическом попеременном замораживании и оттаивании образцов-кубов из бетона различного состава, представленных в табл. 5 и на рис. 1, показали:

1) максимальное снижение массы до 4,36 % и кубиковой прочности на 32 % в контрольном составе 1 после 400 циклов испытаний попеременного замораживания и оттаивания, что превышает установленные показатели требования ГОСТ 10060-2012 (потеря массы и прочности бетона не более 2 и 15 % соответственно);

2) высокие характеристики морозостойкости составов, содержащих комплексный модификатор. При 600 циклах испытаний потеря массы в составах 4 и 5 оказалась 1,82 и 1,6 % при снижении прочности на 10 и 8 % соответственно, что подтверждает достаточный запас прочности и морозостойкости предлагаемых составов модифицированного бетона.

Косвенным доказательством того, что комплексное модифицирование (см. табл. 5, состав 5) способствует повышению морозостойкости бетона, могут быть результаты испытания бетонов на водопоглощение до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании (рис. 2).

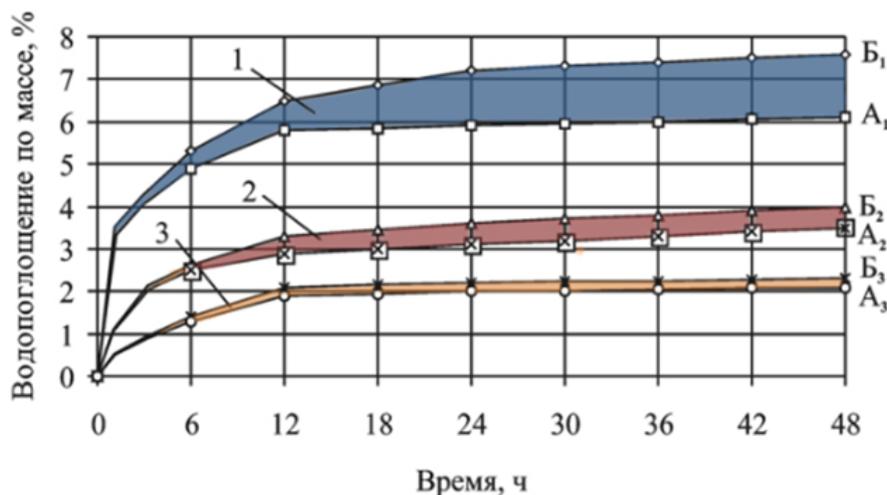


Рис. 2. Водопоглощение бетонов до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании:
1 – A1 и B1 – контрольный состав 1 соответственно до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании;
2 – A2 и B2 – состав 2; 3 – A3 и B3 – состав 5

Из рис. 2 видно, что после испытания на морозостойкость (300 циклов попеременного замораживания и оттаивания) исследуемые составы бетонов имеют разное увеличение водопоглощения. Прирост водопоглощения у состава 1 – 26 %, состава 2 – 12 %, состава 5 – 5–7 %.

Экспериментально доказано улучшение гидрофизических свойств: состав 5 снизил показатель водопоглощения на 60,9 % в сравнении с контрольным составом 1. Водонепроницаемость модифицированного бетона в составе 4 повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным составом 1. При этом наличие в составе 5 волластонита не повлияло на водонепроницаемость. Высокую морозостойкость показали

составы 4 и 5, содержащие комплексный модификатор. При 600 циклах испытания потеря массы была 1,82 % в составе 4 и 1,6 % в составе 5 соответственно. При 600 циклах испытаний в составе 4 прочность снизилась на 10 %, а в составе 5 – на 8 % соответственно.

ВЫВОДЫ

Предложенное модифицирование комплексной добавкой совместно с волластонитом позволяет получить тяжелый бетон высокого качества с улучшенными гидрофизическими свойствами: водопоглощением, водонепроницаемостью и морозостойкостью. Это дает возможность рекомендовать его для производства строительных изделий и конструкций, работающих в суровых условиях эксплуатации.

Было установлено улучшение гидрофизических свойств модифицированного бетона: водопоглощение снизилось на 60,9 %; марка по водонепроницаемости повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным составом. После 600 циклов испытания на морозостойкость потеря массы составила только 1,5–1,8 %, а снижение прочности – 9,1–10,2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А., Дондуков В.Г., Селютин Н.М. Модифицированные бетоны: реальность и перспективы // *Вестник НИЦ Строительство*. 2024. № 1 (40). С. 92–104.
2. Крутских А.В., Петропавловская В.Б., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б. Модифицированные цементные бетоны с дискретным армированием // *Строительство и реконструкция*. 2023. № 3 (107). С. 131–139.
3. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф. Перспективы применения переработанных топливных золошлаковых отходов гидроудаления в сухих строительных смесях. Часть 1 // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 73–79.
4. Isaeva Yu.V., Velichko E.G., Kasumov A.Sh. Structure Optimization of Ultra-light Cement Mortar with Due Regard for Geometrical and Physical and Mechanical Characteristics of Components // *Construction Materials*. 2015. No. 8, pp. 84–87.
5. Yakovlev G.I., Ginuchickaya Yu.N., Kizinievlch O., Kizinievlch V., Gordina A.F. Influence of Dispersions of Multilayer Carbon Nano-tubes on Physical-mechanical Characteristics and Structure of Building Ceramics // *Construction Materials*. 2016. No. 8, pp. 20–29.
6. Величко Е.Г., Шумилиа Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 235–243.
7. Филимонова Ю.С., Величко Е.Г. Исследование комплексной модификации тяжелого бетона // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 4 (96). С. 107–109.
8. Ткач Е.В., Темирканов Р.И. Улучшение физико-механических свойств модифицированного бетона на основе применения химически активированного микрокремнезема с микроармирующим волокном // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 2 (88). С. 123–135.
9. Xu S.Q. The Comprehensive Utilization of Fly Ash // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 459, pp. 82–86. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.459.82> (дата обращения: 23.10.2024).
10. Feng N., Peng G. High Performance Concrete with High Volume Fly Ash // *Key Engineering Materials*. 2006. Vol. 302, 303, pp. 470–478.

11. Xing F., Guo X.Y., Leng F.G., Zhang R.Y. A Development of the Research on High Performance Concrete Incorporated with High Volume Fly Ash // *Key Engineering Materials*. 2006. Vol. 302, pp. 26–34. URL: [https://doi.org/ 10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.26156](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.26156) (дата обращения: 23.10.2024).
12. Kubissa W., Pancewska B., Wilińska I. Comparative Investigations of some Properties Related to Durability of Cement Concretes Containing Different Fly Ashes // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1054, pp. 154–161. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.154> (дата обращения: 23.10.2024).
13. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Иванов А.А. Оптимизация состава гидротехнического бетона с применением композиционных вяжущих // *Техника и технология силикатов*. 2023. Т. 30. № 4. С. 350–356.
14. Александрова О.В., Нгуен Д.В.К., Булгаков Б.И., Петропавловская В.Б. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокопрочных бетонов // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии»*. 2020. № 3. С. 7–15.
15. Урханова Л.А., Иванов А.А., Лхасаранов С.А. Исследование влияния тонкодисперсных добавок на свойства композиционных вяжущих для гидротехнического бетона // *Вестник ВСГУТУ*. 2023. № 2 (89). С. 80–89.
16. Урханова Л.А. Лхасаранов С.А., Данзанов Д.В. Синтез ультрадисперсной добавки, полученной при гидролизе портландцемента, для модификации цементного камня // *Цемент и его применение*. 2022. № 4. С. 52–56.
17. Рахимов М.А., Рахимова Г.М., Хан М.А., Тоимбаева Б.М. Разработка состава комплексной добавки полифункционального действия СС-ЗТН // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 1. С. 112–116.
18. Рахимов М.А., Рахимова Г.М., Рахимов А.М., Садирбаева А.М., Иманов Е.К. Исследование влияния комплексных гидрофобизирующих органоминеральных модификаторов на эксплуатационные свойства тяжелого бетона // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 2-2. С. 294–298.
19. Шестаков Н.И., Алексеева Д.С., Полосина Д.В. Применение фотокаталитических бетонов в дорожном строительстве // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2021. № 12. С. 16–26.
20. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Роль активных минеральных добавок природного происхождения в формировании структуры и свойств гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Вестник технологического университета*. 2017. № 6 (20). С. 60–63.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТКАЧ Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор кафедры градостроительства, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: ev_tkach@mail.ru

ФИЛИМОНОВА Юлия Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного, гражданского и подземного строительства, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 107023, Россия, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38. E-mail: JuliaS06@mail.ru

ЯНКОВИЧ Данило Радивоевич – студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: danyavkuba@gmail.com

ПАЕВСКИЙ Василий Иванович – студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: 1337827@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Ткач Е.В., Филимонова Ю.С., Янкович Д.Р., Паевский В.И. Исследование гидрофизических свойств тяжелого бетона, модифицированного комплексным модификатором и работающего в суровых условиях эксплуатации // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (24). С. 31–42.

IMPROVEMENT OF HYDROPHYSICAL PROPERTIES OF MODIFIED HEAVY-DUTY CONCRETE WORKING IN SEVERE OPERATING CONDITIONS

E.V. Tkach¹, Yu.S. Filimonova², D.R. Yankovich¹, V.I. Paevsky¹

¹*National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)*

²*Moscow Polytechnic University (Moscow)*

Abstract. The article presents the results of research on the positive effect of complex modification on the properties of heavy concrete. The study was carried out by reducing the content of binder (cement) and replacing it with metakaolin, due to which the hydrophysical characteristics were increased. It is noted that the positive results of the study make it possible to apply this composition in practice to obtain building structures with specified characteristics, and such structures can be operated under conditions of increased load and aggressive environment, in particular, in the construction of tunnels.

Keywords: tunnel structures, aggressive environmental factors, complex modifier, hydrophysical properties, harsh operating conditions.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TKACH Evgeniya Vladimirovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Urban Development, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: ev_tkach@mail.ru

FILIMONOVA Yulia Sergeevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial, Civil and Underground Construction, Moscow Polytechnic University, 38, Bolshaya Semenovskaya Street, Moscow, 107023, Russia. E-mail: JuliaS06@mail.ru

YANKOVICH Danilo Radivoevich – Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: danyavkuba@gmail.com

PAEVSKY Vasily Ivanovich – Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: 1337827@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Tkach E.V., Filimonova Yu.S., Yankovich D.R., Paevsky V.I. Improvement of hydrophysical properties of modified heavy-duty concrete working in severe operating conditions // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 31–42.

УДК 691.328.43

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРЫ И ДОБАВКИ МИКРОКАЛЬЦИТА
В СОСТАВАХ ЭФФЕКТИВНОГО БАЗАЛЬТОФИБРОБЕТОНА**

К.А. Эквист, В.В. Белов

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Эквист К.А., Белов В.В., 2024

Аннотация. В статье отмечено, что бетонные тонкостенные облицовочные изделия все чаще используются в современном строительстве, в связи с чем возникает необходимость создания состава, изделия из которого, с одной стороны, должны выглядеть эстетично, а с другой – обладать рядом необходимых строительно-технических свойств. Указано, что готовые изделия отвечают жестким требованиям к прочности, трещиностойкости, морозостойкости и коррозионной стойкости. Одним из решений данной проблемы обозначено использование фиброволокна как микроармирующего компонента. Исследовано влияние базальтовой фибры и микрокальцита на характеристики бетона.

Ключевые слова: базальтовая фибра, микроармирующий компонент, добавка микрокальцита, базальтофибробетон.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-42-49

ВВЕДЕНИЕ

В обзорной статье [1], написанной авторами настоящей работы, указано, что применение дисперсных волокон в составе бетона позволяет значительно улучшить его механические характеристики, такие как прочность, устойчивость к разрушению и деформациям. Волокна создают в бетоне дополнительные арматурные элементы, которые повышают его сцепление и прочность. Это особенно важно при производстве тонкостенных облицовочных изделий, так как они подвержены высоким нагрузкам и воздействию внешней среды.

Выбор типа волокон зависит от требований к конечному продукту. Металлические волокна, например стальные, обладают высокой прочностью и устойчивостью к деформациям, что делает их идеальным выбором для использования в бетоне. Неметаллические волокна, такие как стекловолокно и полимерные волокна, также имеют хорошие прочностные характеристики и могут быть использованы в различных условиях.

Процесс производства фиброармированного бетона требует точного дозирования волокон и их равномерного распределения по объему бетонной смеси. Для этого