

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-278-285>

УДК 666.972; 693.54

Защитная способность цементного бетона с полифункциональной добавкой по отношению к стальной арматуре

Канд. техн. наук, доц. Н. С. Гуриненко¹⁾,
докт. техн. наук, проф. Э. И. Батыновский¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В статье приведены результаты исследований влияния компонентов комплексной полифункциональной добавки на защитную способность бетона по отношению к стальной арматуре железобетонных строительных конструкций. В соответствии с современными тенденциями применения химических добавок в бетон с целью комплексного воздействия как на процессы твердения и формирования его структуры, так и на конечные физико-механические и эксплуатационные свойства бетона рассматриваемая добавка состоит из ряда компонентов. В ее состав входят пластифицирующий, ускоряющий твердение и уплотняющий структуру твердеющего бетона компоненты, а также аморфный ультрадисперсный микрокремнезем. Наличие последнего сопровождается реакцией с гидроксидом кальция и переводом ее в связанное состояние в твердеющем бетоне, что создает предпосылки к понижению щелочности (рН-фактора) в его объеме и соответственно может создавать опасность коррозии стальной арматуры железобетонных конструкций. С учетом данного обстоятельства были выполнены исследования с целью установления степени влияния присутствующего в составе добавки аморфного ультрадисперсного микрокремнезема на свойства бетона, включая оценку его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, а также изменение прочности с течением времени (в настоящей статье до «возраста» бетона в три года от момента изготовления образцов составов без химических добавок и с введением комплексной полифункциональной добавки). В результате выявили повышение плотности, прочности бетона и его эксплуатационных свойств, в том числе защитную способность по отношению к стальной арматуре, за счет комплексного воздействия компонентов добавки, включая снижение начального водосодержания, повышение плотности цементного камня и переходных зон его контакта с поверхностью зерен заполнителя в бетоне.

Ключевые слова: полифункциональная добавка, микрокремнезем, ультрадисперсный микрокремнезем, цементный бетон, плотность, непроницаемость, арматура, защитная способность

Для цитирования: Гуриненко, Н. С. Защитная способность цементного бетона с полифункциональной добавкой по отношению к стальной арматуре / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батыновский // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 278–285. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-278-285>

Protective Ability of Cement Concrete with Polyfunctional Additive in Relation to Steel Reinforcement

N. S. Gurinenko¹⁾, E. I. Batyanovskiy¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the results of studies of the influence of the components of a complex polyfunctional additive on the protective ability of concrete in relation to steel reinforcement of reinforced concrete building structures. In accordance with modern trends in the use of chemical additives in concrete with the aim of a complex effect both on the processes

Адрес для переписки
Батыновский Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-73
bat47@mail.ru

Address for correspondence
Batyanovskiy Eduard I.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-96-73
bat47@mail.ru

of hardening and the formation of its structure, and on the final physical, mechanical and operational properties of concrete, the additive in question consists of a number of components. It consists of a plasticizing component, accelerating hardening and compacting the structure of hardening concrete, as well as amorphous ultrafine microsilica. The presence of the latter is accompanied by a reaction with calcium hydroxide and its transfer to a bound state in hardening concrete, which creates prerequisites for a decrease in alkalinity (pH factor) in its volume and, accordingly, can create a risk of corrosion of steel reinforcement of reinforced concrete structures. Taking into account this circumstance, studies have been carried out in order to establish the degree of influence of the amorphous ultrafine microsilica present in the composition of the additive on the properties of concrete, including an assessment of its protective properties in relation to steel reinforcement, as well as a change in strength over time (in this paper up to the "age" of concrete in three years from the moment of manufacture of samples of compositions without chemical additives and with the introduction of a complex polyfunctional additive). As a result, an increase in the density, strength of concrete and its operational properties, including the protective ability in relation to steel reinforcement, due to the complex effect of the additive components, has been revealed, including a decrease in the initial water content and an increase in the density of the cement stone and transition zones of its contact with the surface of the aggregate grains in concrete.

Keywords: polyfunctional additive, microsilica, ultradispersed microsilica, cement concrete, density, impermeability, reinforcement, protective ability

For citation: Gurinenko N. S., Batyanovskiy E. I. (2023) Protective Ability of Cement Concrete with Polyfunctional Additive in Relation to Steel Reinforcement. *Science and Technique*. 22 (4), 278–285. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-278-285> (in Russian)

Введение. В современных условиях, несмотря на возросшее качество и наличие широкого выбора добавок в бетон, характеризующихся мононаправленным действием, во все больших объемах и с большей эффективностью используются добавки полифункционального действия. При этом наибольший эффект достигается сочетанием химических высокоэффективных пластифицирующих и ускоряющих твердение веществ с высокодисперсной минеральной составляющей – микрокремнеземом. Однако при использовании в комплексных добавках традиционного микрокремнезема его количество достигает 10 % от массы цемента, а в вариантах замены на иные, содержащие аморфный кремнезем вещества – еще больше [1–3], что создает неудобства при введении в состав бетона таких добавок и ограничивает их применение. В разработанной авторами комплексной полифункциональной добавке в бетон [4–6] в ее состав кремнеземистый компонент введен в виде ультрадисперсного (удельная поверхность составляет $S_{уд} \sim 350 \text{ м}^2/\text{г}$) микрокремнезема. Экспериментально доказано [5, 6], что за счет многократно более высокой удельной поверхности данная разновидность микрокремнезема в дозировке 0,75–1,0 % от массы цемента обеспечивает эффект, равный введению в бетон 10 % традиционного микрокремнезема. С учетом общепризнанного «механизма» действия аморфного микрокремнезема в цементном бетоне, базирующегося на реакции его с гидроокисью кальция и образовании нерастворимых кристаллогидратов силикатов кальция, что уплотняет и упрочняет структуру бетона, появляется опасность критического понижения pH-фактора жидкости, заполняющей

его поровое пространство. То есть одновременно с преимуществами, которые обеспечивают эти добавки, существует вероятность, что их введение в состав может привести к снижению защитной способности бетона по отношению к стальной арматуре. Результаты оценки такого влияния предложенной добавки на бетон приведены в материале настоящей статьи.

Материалы для исследований. В исследованиях использовали материалы: портландцемент марки ПЦ 500 по ГОСТ 10178, соответствующий классу СЕМ I 42,5 N по СТБ EN 197-1-2015 и ЦЕМ I 42,5 N по ГОСТ 31108-2020; компоненты полифункциональной добавки: ускоритель твердения – сульфат натрия (CH; Na_2SO_4) по ГОСТ 21458-75 и уплотняющий структуру цементного камня (бетона) – сульфат алюминия (CA; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) по ГОСТ 12966-85; заполнители для бетона – щебень гранитный традиционный фракций 5–10 и 5–20 мм (ГОСТ 8267-93); песок природный Мк ~2,6–2,8 (ГОСТ 8736-93); в качестве активного минерального компонента добавки использовали традиционный микрокремнезем (МК) марки МК-85, соответствующий требованиям СТБ EN 197-1-2015 и ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК), соответствующий ТУ 2168-002-14344269-09, характеризующийся большей удельной поверхностью за счет малых размеров частиц аморфного SiO_2 , а значит, и большим «реакционным» потенциалом. Это подтверждают данные сравнительного гранулометрического анализа дисперсности традиционного микрокремнезема (рис. 1а) и УДМК (рис. 1б), полученные с помощью прибора для измерения дисперсности твердофазных материалов Analysette 22, Nano Tec (Fritsch).

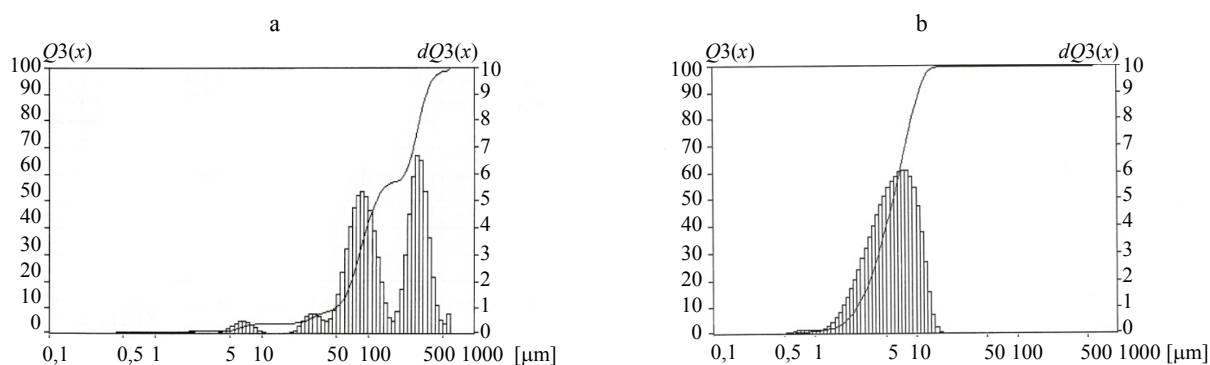


Рис. 1. а – гранулометрический состав микрокремнезема;
б – гранулометрический состав ультрадисперсного микрокремнезема

Fig. 1. a – granulometric composition of microsilica; b – granulometric composition of ultrafine microsilica

В качестве пластификаторов использовали «Стахемент 2000-М Ж 30» (Пл), выпускаемый по ТУ ВУ 800013176.004–2011; С-3 (ТУ 5745-001-97474489–2007) и «Реламикс ПК» (ТУ ВУ 190679156.002–2013), которые согласно СТБ 1112–98 относятся к пластифицирующим добавкам I группы.

Целью исследований было выявление влияния комплексной полифункциональной добавки [4], характеризующейся пластифицирующим и ускоряющим твердение цемента действием, на свойства бетона, включая его защитную способность по отношению к стальной арматуре.

Пуццолановая активность кремнезема и рН-фактор. Представленная полифункциональная добавка в бетон, содержащая ускоряюще-уплотняющий компонент ($\text{СН} + \text{СА}$), ультрадисперсный микрокремнезем и суперпластификатор на основе поликарбоксилатных смол, за счет их совокупного действия обеспечивает повышение темпа роста и уровня прочности бетона. При этом в обеспечении эффективности каждый компонент играет свою роль. Так, ультрадисперсный микрокремнезем способствует уплотнению структуры контактной переходной зоны [7, 8] за счет реакции с $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В результате снижается ее пористость, возрастает качество (сила) сцепления цементного камня с заполнителем в бетоне и арматурой в железобетоне. Одновременно тонкодисперсные частицы микрокремнезема выступают в роли «центров кристаллизации» [9] при формировании кристаллогидратной структуры в твердеющем цементном камне, что сопровождается ростом темпа набора и уровнем прочности затверде-

шего бетона. Решая задачу по всесторонней оценке влияния УДМК на процесс твердения и свойства бетона, были проведены исследования его пуццолановой активности в сравнении с другими используемыми в бетоне добавками, содержащими аморфный кремнезем. Результаты экспериментов, отраженные графическими зависимостями рис. 2, получены по методике «Бутта–Тимашева» [10], которая базируется на способности минеральных добавок, содержащих активный (аморфный) кремнезем, «поглощать» известь из известкового раствора.

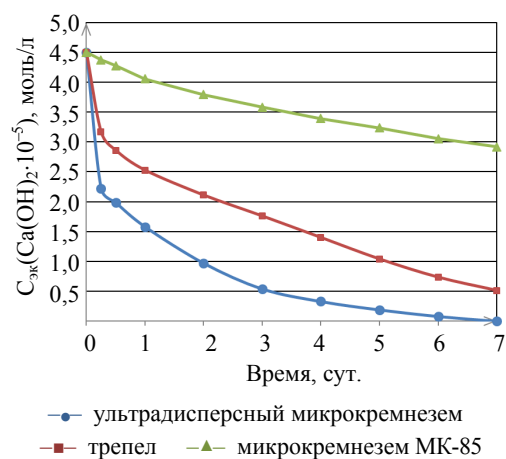


Рис. 2. Пуццолановая активность ряда веществ, содержащих аморфный кремнезем

Fig. 2. Pozzolanic activity of a number of substances containing amorphous silica

Очевидно, что пуццолановая активность ультрадисперсного микрокремнезема существенно превышает таковую для традиционного микрокремнезема. В этой связи, несмотря на то обстоятельство, что рекомендуемая дозиров-

ка в бетон УДМК в исследуемой добавке не превышает 1 % по массе цемента, следовало оценить его влияние на изменения уровня щелочности цементного камня и затвердевшего бетона, так как существует опасность критического снижения уровня щелочности (рН-фактор) бетона и, как следствие, развития коррозии арматуры с течением времени, что может привести к снижению несущей способности железобетонных строительных конструкций.

На начальном этапе исследований с учетом того, что, как отмечалось, введение аморфного кремнезема в цементный бетон способствует связыванию гидроокиси кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) в нерастворимые гидросиликаты кальция и тем самым возможно понижение уровня щелочности среды в бетоне, провели соответствующую оценку влияния УДМК на этот показатель, используя методику его определения на водных вытяжках, полученных из образцов цементного камня. С этой целью готовили цементное тесто нормальной густоты без добавок и с добавками, вид и дозировка которых приведены в табл. 1, как и результаты экспериментального определения значений рН-фактора. Разновидности добавок, вводимых в цементное тесто, являются компонентами комплексной полифункциональной добавки. Дозировки добавок приведены в % по сухому веществу от массы цемента.

Измерения проводили с помощью портативного рН-метра марки HI 83141, а полученные результаты сведены в табл. 1.

Сопоставление данных за весь оцененный период твердения по всем составам цементного теста и затвердевшего цементного камня свидетельствует о незначительном снижении значений рН-фактора под влиянием веществ вводимых добавок. При стабилизации его величин, например после 20 сут. твердения, для камня без добавок и с введением комплексной добавки относительное снижение составляет: $((12,7 - 12,5) / 12,7) \cdot 100 \sim 1,6 \%$, т. е. незначительную величину. В особой мере, если учесть, что оптимальная дозировка в бетон комплексной добавки составляет $\leq 1,0 \%$ по сухому веществу по массе цемента [6].

Считается [11], что минимально необходимый уровень щелочности, предотвращающий развитие процесса коррозии стальной арматуры в бетоне, должен характеризоваться величиной $\text{pH} \geq 11,8$ ед. Очевидно, что, как входящие в состав комплексной добавки ее компоненты, так и исследуемое вещество УДМК не критически снижают рН-фактор в цементном камне и, соответственно, при использовании в железобетоне комплексной добавки не потребуются дополнительной защиты стальной арматуры.

Таблица 1

рН водных вытяжек образцов цементного камня
pH of water extracts of cement stone samples

Время твердения	Без добавок	0,5 % Ст	0,5 % Ст + + 10 % МК	0,5 % Ст + + 1 % УДМК	0,5 % Ст + + 1,5 % УДМК	0,5 % Ст + + 1 % УДМК + + 0,5 % СН + + 0,25 % СА
1 мин	12,40	12,30	12,30	12,30	12,30	12,30
2 мин	12,40	12,40	12,30	12,30	12,30	12,30
10 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
30 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
60 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
2 сут.	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
10 сут.	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
20 сут.	12,70	12,71	12,69	12,65	12,63	12,55
30 сут.	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50
60 сут.	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50

Оценка защитной способности бетона.

Защитную способность бетона по отношению к стальной арматуре путем электрохимических испытаний оценили на сериях образцов по направлению 2 по СТБ 1168–99 [12]. Эта методика позволяет определить способность бетона противостоять агрессивному внешнему воздействию раствора соли (NaCl) при циклическом насыщении – высушивании образцов. Повторение циклов сопровождается диффузией хлор-ионов через защитный слой бетона к заделанному в нем стальному стержню. Эффективность защиты предопределяется плотностью и непроницаемостью структуры бетона, уровнем щелочности жидкости в его поровом пространстве и толщиной защитного слоя. Для инициирования процесса диффузии иона-окислителя (Cl^-) сквозь бетон и для оценки защитной способности бетона (кроме указанных циклических воздействий) к заделанному в бетон стальному (имитирующему арматуру) стержню прикладывают потенциал с отрицательным знаком, переводя его к положительному знаку в процессе испытаний. Оценку коррозионного состояния стали производят построением анодной поляризационной кривой по изменению плотности тока во взаимосвязи с изменением приложенного к ней потенциала. Базовым по оценке по данному методу является положительный потенциал в $E = 300$ мВ, для которого определяется плотность тока (i , мкА/см²) на поверхности стального элемента. Ее значение устанавливают проецированием на ось y точки пересечения построенной анодной поляризационной кривой, полученной в процессе испытаний образца, с проекцией потенциала в 300 мВ, значения которого откладывают на оси x .

На рис. 3а приведены примеры оценки коррозионного состояния стали образцов бетона

без добавки, на рис. 3б – с полифункциональной добавкой в виде экспериментально зафиксированной прибором анодной поляризационной кривой, отражающей изменение плотности тока (i , мкА/см²) в зависимости от изменения потенциала, приложенного к стальной арматуре (стальной стержень Ø 10 мм в геометрическом центре образца-балки размерами 70×70×100 мм), E , мВ, после 10 циклов насыщения в 5%-ом растворе NaCl – высушивания, в соответствии с положениями методики СТБ 1168–99 [12].

Экспериментальные данные, отраженные зависимостями рис. 3, получены при испытаниях образцов, бетон которых соответствует составу 1 (заводской без добавок; класс по прочности на сжатие С 25/30) и 3 (с оцениваемой добавкой), приведенным в табл. 2. При этом состав 3 с полифункциональной добавкой характеризовался сниженным на ~10 % расходом цемента. Состав 2 принят для сравнения при оценке свойств бетона и характеризовался наличием комплексной добавки, но в составе которой отсутствовал УДМК.

Анализ зависимостей рис. 3а и 3б показывает, что, несмотря на существенное снижение содержания цемента в бетоне и наличие в комплексной добавке аморфного кремнезема, его защитная способность по отношению к стальной арматуре значительно выше, чем обеспечиваемая (в условиях, выполненных по СТБ 1168–99 [12] определений) исходным заводским составом. Так, если для последнего плотность тока при $E = 300$ мВ составила ~4,4 мкА/см², то для состава бетона с добавкой ~3,0 мкА/см². Эти данные отражают рост защитной способности бетона с добавкой за счет повышения его плотности и непроницаемости, так как эксперименты в остальном выполнены с соблюдением правила «прочих равных условий».

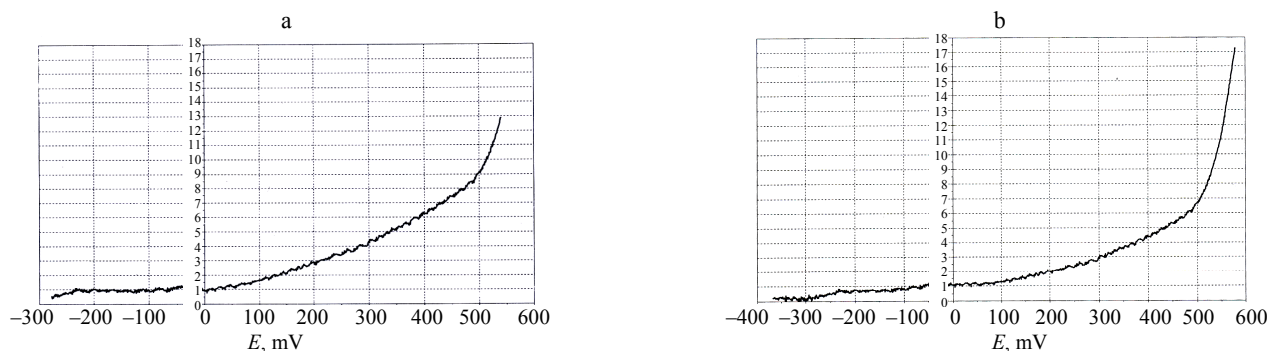


Рис. 3. Анодная поляризационная кривая образцов бетона после 10 циклов насыщения (в 5%-м растворе NaCl) – высушивания: а – без добавки; б – с полифункциональной добавкой

Fig. 3. Anode polarization curve of concrete samples after 10 saturation cycles (in 5 % NaCl solution) – drying: а – without additive; б – with multifunctional additive

Таблица 2

**Составы бетона (номинальный класс по прочности на сжатие С 25/30 (B30))
и характеристики бетонной смеси**

**Concrete compositions (nominal compressive strength class C 25/30 (B30))
and characteristics of concrete mixture**

Состав бетона	Расход составляющих, кг/м ³ , бетонной смеси					Характеристика бетонной смеси		
	Цемент	Песок	Щебень	Химическая добавка, % и кг	Вода (с учетом W_{II} и W_{III})	(В/Ц) _б	Средняя плотность, кг/м ³	ОК, см
1 (заводской без добавок)	444	690	1100	–	195	0,44	2430	5,5
2 (с комплексной добавкой без УДМК)	433	795	1150	0,5 % СН + 0,25 % СА + + 0,25 % Пл (0,95 % от МЦ; 4,1 кг)	147	0,34	2530	5,0
3 (с полифункциональной добавкой с УДМК)	400	860	1150	0,35 % СН + 0,15 % СА + + 0,25 % Пл + 0,25 % УДМК (1,0 % от МЦ; 4,0 кг)	136	0,34	2540	6,0

Таблица 3

**Свойства бетона
Concrete properties**

№ состава по табл. 2	Водопоглощение, % мас.	Марка по водонепроницаемости	Марка по морозостойкости	Защитная способность (i , мкА/см ² , при $E = 300$ мВ)	Прочность на сжатие* после тепловой обработки, МПа	Прочность на сжатие* при НВУ, МПа, в возрасте	
						28 сут.	трех лет
1	4,8	W4	F300	4,4	35,0	63,2	71,9
2	3,9	W6	F400–F500	4,0	53,6	69,2	75,4
3	3,5	W8	F500	3,0	53,5	71,2	78,2

* Прочность бетона на сжатие приведена к базовому размеру образцов-кубов с ребром 150 мм.

Следует отметить, что для всех приведенных в табл. 2 вариантов составов бетона, включая состав 1 (заводской), экспериментально подтверждено, что они в полной мере обеспечивают защитную способность по отношению к стальной арматуре. Во всех случаях плотность тока при $E = 300$ мВ была ниже $i = 5,0$ мкА/см², что по СТБ 1168–99 [12] обеспечивает пассивное (без признаков коррозии) состояние в бетоне стальной арматуры, включая преднапряженную. Таким образом, возросшая в бетоне с добавкой защитная способность по отношению к стальной арматуре ($i \sim 3,0$ мкА/см² при $E = 300$ мВ) гарантированно обеспечивает возможность ее использования в преднапряженных железобетонных конструкциях при внешней агрессии эксплуатационной среды, так как по СТБ 1168–99 [12] плотность тока в этом случае не должна превышать 5,0 мкА/см².

Результаты производственной апробации и свойства бетона. На предприятии «Комбинат железобетонных изделий и конструкций» ОАО «Оршанский строительный трест № 18»

(г. Орша) осуществлена производственная апробация результатов исследований, в процессе которой оценили эффективность использования полифункциональной добавки [4], при изготовлении плит преднапряженных дорожно-настила (ПДН) и других изготавливаемых изделий. В табл. 2 представлены составы бетона, примененные при изготовлении плит ПДН. В табл. 3 приведены данные о прочности (на сжатие) и ряде эксплуатационных свойств бетона, установленные как в процессе производственной апробации, так и при сопровождающих ее реализацию лабораторных исследованиях, выполненных в заводской лаборатории и БНТУ.

Условия твердения бетона при тепловлажностной обработке соответствовали практиковавшимся на момент производственных исследований на предприятии с прогревом образцов бетона и изделий в ямной камере по режиму: предварительная выдержка 11 ч (с 13:00 до 24:00); подача пара с 24:00 до 2:00 (2 ч с нагревом среды до 50–60 °С); выдержка в ка-

мере 5,5 ч (до 7:00) и остывание образцов до распалубки и испытаний 4 ч (испытания в 10:00–11:00); последующее твердение образцов бетона при определении прочности – нормально-влажностные условия ($t \sim 20 \pm 3$ °C; $\phi \geq 90$ %) до возраста 28 сут. и трех лет включительно.

Водопоглощение по массе, водонепроницаемость и морозостойкость определены по действующей нормативно-технической документации [13–15].

Результаты экспериментальной оценки изменений водопоглощения, водонепроницаемости и морозостойкости бетона без добавок и с введением в его состав комплексной (без УДМК) и полифункциональной (содержащей УДМК) добавок одновременно отражают причинно-следственную связь роста защитной способности бетона состава 3. Несмотря на уменьшение на ~10 % содержания в нем цемента, в сравнении с составами 1 и 2 свойства бетона, характеризующие его непроницаемость, существенно возрастают, а на этой основе повышается и защитная способность бетона по отношению к стальной арматуре. Наличие в комплексной полифункциональной добавке реакционно-способного аморфного кремнезем, что, как мы считаем, способствует уплотнению зон контакта поверхности зерен заполнителей с цементным камнем в бетоне, обеспечивает этот эффект. Данный вывод подтверждает сопоставление результатов оценки всей (приведена в табл. 3) совокупности свойств бетона составов 2 (добавка без УДМК) и 3 (содержащая УДМК и компоненты-аналоги; табл. 2).

Прочность бетона после тепловой обработки по практиковавшемуся на момент апробации заводскому режиму составила ~55 % от ее уровня в проектом 28-суточном возрасте для бетона без добавок и ≥ 75 % для бетона с добавками. К проектному возрасту прирост прочности бетона с комплексом без УДМК составил ~9 % и с УДМК ~13 %, несмотря на то что расход цемента в последнем случае был снижен относительно бетона без добавок (состав 1) на ~10 %, а по сравнению с составом 2 на ~8 %. Причиной роста как относительной прочности, так и ее абсолютных значений при сравнении данных по составам 2 и 3 является рост плотности и прочности переходных зон контакта зерен заполнителя с цементным камнем за счет реакции $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [7, 8] с активным кремнеземом и образованием кристаллогидратных новообразований силикатной группы. Результирующим

эффектом являются упрочнение сил сцепления поверхности заполнителя с цементным камнем и рост прочности бетона, а также его непроницаемости как основы повышения эксплуатационных свойств.

Оценка изменений прочности образцов бетона за три года (условия хранения нормально-влажностные) подтверждает вывод И. Н. Ахвердова – М. А. Шалимо [16, 17] о наличии закономерной связи между формированием плотности структуры цементного камня и бетона в целом на начальном этапе ее становления и последующим ростом прочности с течением времени. Очевидно, что сопоставление данных как по всем трем составам, так и особенно по составам 2 и 3 подтверждает эту закономерность. В частности, для бетона составов 2 и 3 при практическом равенстве водоцементного отношения (т. е. одинаковой пористости цементного камня) и консистенции смеси по подвижности, но при повышении плотности структуры бетона состава 3 за счет введения аморфного SiO_2 с течением времени в большей мере растет и его прочность. Совокупно с этим обеспечивается рост эксплуатационных свойств бетона, включая защитную способность по отношению к стальной арматуре железобетонных строительных конструкций.

ВЫВОДЫ

1. Введение в состав тяжелого конструкционного бетона комплексной полифункциональной добавки, содержащей ультрадисперсный микрокремнезем в активной аморфной форме, не снижает его защитную способность по отношению к стальной арматуре, включая вариант применения добавки в бетоне для изделий (конструкций) с преднапряжением арматуры.

2. За счет комплексного воздействия компонентов добавки, включая снижение начального водосодержания и повышение плотности цементного камня и переходных зон его контакта с поверхностью зерен заполнителя, обеспечивается рост плотности, прочности бетона и его эксплуатационных свойств, в том числе защитной способности по отношению к стальной арматуре.

3. Оценка прочности бетона, приготовленного без и с наличием добавок, в 3-летнем возрасте показала стабильный рост ее величины, базирующийся на повышении плотности бетона за счет использования в его составе комплексной полифункциональной добавки, содержащей ультрадисперсный микрокремнезем.

ЛИТЕРАТУРА

- Каприелов, С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов / С. С. Каприелов // Бетон и железобетон. 1995. № 4. С. 16–20.
- Каприелов, С. С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С. С. Каприелов, В. Г. Батраков, А. В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. 1999. № 6. С. 6–10.
- Модификатор бетона Эмбэлит. Технические условия: ТУ 5870-176-46854090-04. – Введ. 02.03.2004. М.: Госстандарт, 2004. 27 с.
- Комплексная добавка для ускорения твердения и повышения прочности бетона: Евраз. пат. 035404 / Э. И. Батыновский, Н. С. Гуриненко. Оpubл. 08.06.2020.
- Гуриненко, Н. С. Влияние полифункциональной добавки на процесс твердения и свойства цементного бетона / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батыновский // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 4. С. 330–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-330-338>.
- Батыновский, Э. И. Бетон с полифункциональной кремнеземсодержащей добавкой / Э. И. Батыновский, Н. С. Гуриненко. Минск: БНТУ, 2021. 195 с.
- Wang, Jia. Investigation of structure and properties of the interfacial zone between lime aggregate and cement paste / Jia Wang // J. of Chin. Silicate Soc. 1987. Vol. 2. P. 114–121.
- Texture of calcium hydroxide near the cement paste-aggregate interface / R. J. Detwiler [et al.] // Cement a. Concrete Research. 1988. Vol. 18, № 5. P. 823–829. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90109-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90109-3).
- Ратинов, В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989. 186 с.
- Бутт, Ю. М. Практикум по химической технологии вяжущих материалов / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. М.: Высш. шк., 1973. 503 с.
- Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин [и др.]; под общ. ред. В. М. Москвина. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
- Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона = Бетоны. Метод контролю карозійного стану сталльної арматури в бетоне і захисних властивостей бетону: СТБ 1168–99. Взамен СТ СЭВ 44–21–83; введ. 01.01.00. Минск: Минстройархитектуры, 1999. III, 20 с.
- Бетоны. Метод определения водопоглощения: ГОСТ 12730.3–78. Взамен ГОСТ 12730–67; введ. 01.01.80. М.: Стандартиформ, 2007. 4 с.
- Бетоны. Методы определения водонепроницаемости: ГОСТ 12730.5–84. Взамен ГОСТ 12730.5–78, ГОСТ 19426–74; введ. 01.07.85. М.: Стандартиформ, 2007. 12 с.
- Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования: ГОСТ 10060.0–95. Взамен ГОСТ 10060–87; введ. 01.04.97. Минск: Минстройархитектуры, 1997. 7 с.
- Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
- Ахвердов, И. Н. Ультразвуковое вибрирование в технологии бетона / И. Н. Ахвердов, М. А. Шалимо. М.: Стройиздат, 1969. 133 с.

REFERENCES

- Kaprielov S. S. (1995) General Patterns of Formation of the Structure of Cement Stone and Concrete with the Addition of Ultra-Dispersed Materials. *Beton i Zhelezobeton*, (4), 16–20 (in Russian).
- Kaprielov S. S., Batrakov V. G., Sheinfeld A. V. (1999) Modified Concrete of a New Generation: Reality and Perspective. *Beton i Zhelezobeton*, (6), 6–10 (in Russian).
- TU [Technic Specifications] 5870-176-46854090-04. *Concrete modifier Embelit. Specifications*. Moscow, Gosstandart Publ., 2004. 27 (in Russian).
- Batyanovsky E. I., Gurinenko N. S. (2020) *Complex Additive for Accelerating Hardening and Increasing the Strength of Concrete*: Eurasian Patent No 035404.
- Gurinenko N. S., Batyanovskiy E. I. (2019) Influence of Polyfunctional Additive on Hardening Process and Properties of Cement Concrete. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 18 (4), 330–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-330-338> (in Russian).
- Batyanovskiy E. I., Gurinenko N. S. (2021) *Concrete with Polyfunctional Silica-Containing Additive*. Minsk, Belarusian National Technical University. 195 p. (in Russian).
- Wang Jia (1987) Investigation of Structure and Properties of the Interfacial Zone Between Lime Aggregate and Cement Paste. *J. of Chin. Silicate Soc.*, 2, 114–121.
- Detwiler R. J., Monteiro P. J. M., Wenk H.-R., Zhong Z. (1988) Texture of Calcium Hydroxide Near the Cement Paste-Aggregate Interface. *Cement a. Concrete Research*, 18 (5), 823–829. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90109-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90109-3).
- Ratinov V. B., Rozenberg T. I. (1989) *Additives in Concrete*. 2nd ed. Moscow: Stroyizdat Publ. 186 (in Russian).
- Butt, Yu. M., Timashev V. V. (1973) *Laboratory Manual on Chemical Technology of Binders*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 503 (in Russian).
- Moskvin V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. N., Guzeev E. A. (1980) *Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods of their Protection*. Moscow, Stroyizdat Publ. 536 (in Russian).
- STB [Standards of the Republic of Belarus] 1168–99. *Concrete. Method for Monitoring the Corrosion State of Steel Reinforcement in Concrete and the Protective Properties of Concrete*. Minsk, Publishing House “Minstroyarkhitektury”, 1999. 20 (in Russian).
- State Standard 12730.3–78. *Concrete. Method for Determining Water Absorption*. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 4 (in Russian).
- State Standard 12730.5–84. *Concrete. Method for Determining Water Resistance*. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 12 (in Russian).
- State Standard 10060.0–95. *Concrete. Method for Determining Frost Resistance. General Requirements*. Minsk, Publishing House “Minstroyarkhitektury”, 1997. 7 (in Russian).
- Akhverdov I. N. (1981) *Fundamentals of Concrete physics*. Moscow, Stroyizdat Publ. 464 (in Russian).
- Akhverdov I. N., Shalimo M. A. (1969) *Ultrasonic Vibration in Concrete Technology*. Moscow, Stroyizdat Publ. 133 (in Russian).

Поступила 10.02.2023

Подписана к печати 11.04.2023

Опубликована онлайн 31.07.2023

Received: 10.02.2023

Accepted: 11.04.2023

Published online: 31.07.2023