

SIZOV Yuri Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: *uvsizov1961@yandex.ru*

ROCHEVA Ekaterina Vladislavovna – Design Engineer for Water Supply and Sanitation Systems, Ltd «Promstroyengineering», b. 1A, Karavannaya St, Municipal District «Palace District», Saint-Petersburg, Russia. E-mail: *Rocheva_97@mail.ru*

CITATION FOR AN ARTICLE

Gavrilenko A.V., Barkaya T.R., Sizov U.V., Rocheva E.V. Bending test of a metal-wood panel with flat galvanized sheet walls stiffened by wooden ribs // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 1 (13), pp. 5–13.

УДК 691.587

СПОСОБЫ СОЗДАНИЯ РЕЗЕРВНОЙ ПОРИСТОСТИ В БЕТОНЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ

А.С. Джабаров, В.В. Белов

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Джабаров А.С., Белов В.В., 2022

Аннотация. Долговечность бетона зависит от ряда факторов, в числе которых морозостойкость и проницаемость. В статье рассматриваются способы улучшения такой важной характеристики бетона, как морозостойкость (способность выдерживать попеременное замораживание и оттаивание в насыщенном водой (раствором) состоянии без образования дефектов). Повышение морозостойкости бетона осуществляется посредством введения в состав бетонной смеси воздухововлекающих и пуццолановых добавок, алюмосиликатных микросфер. Во многих рассмотренных работах отмечается, что суперпластификатор, применяемый совместно с вышеперечисленными добавками, улучшает их воздействие на цементный камень и бетон. В данной работе более подробно рассмотрены воздействие алюмосиликатных полых микросфер на структурообразование в цементном камне и механизм повышения морозостойкости с их помощью.

Ключевые слова: алюмосиликатные полые микросферы, морозостойкость, механохимическая активация, суперпластификатор, добавка, резервная пористость, прочность, плотность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-13-22

ВВЕДЕНИЕ

В условиях атмосферного воздействия разрушение бетона происходит в основном из-за морозной деструкции, в особенности на местах переменного уровня воды [1]. Сопротивление бетона морозной деструкции способствует продлению его срока службы.

«Морозный» износ бетонов можно связать с последствиями от деструкции материала как без образования, так и с образованием криофазы. Разрушение под воздействием низких температур происходит из-за развития напряжений в твердой фазе материала при замерзании воды в порах.

В микромасштабе морозное разрушение является результатом следующих процессов:

термодеструкции – многократного циклического нагревания и охлаждения при влиянии различного коэффициента линейного расширения составляющих бетона;

деструкции, определяемой влиянием различий коэффициентов температурного деформирования составляющих системы «лед – твердая фаза» в результате многократного охлаждения и нагревания;

адсорбционного понижения прочности;

деструкции вследствие химической коррозии;

деструкции в результате появления внутри давления (кристаллизация в лед).

Морозное разрушение в макромасштабе включает в себя:

послойную термодеструкцию материала (десквамацию) за счет неравномерного теплового поля в сечении;

послойную деструкцию от сегрегативного ледообразования [2].

Вопрос повышения морозостойкости бетонных и железобетонных конструкций и изделий на сегодняшний день является актуальным. Бетон с улучшенной морозостойкостью требует комплексного подхода при разработке состава.

Целью работы являлось изучение способов повышения морозостойкости бетона.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА

Бетонные и железобетонные сооружения во многих регионах Российской Федерации и в странах, где преобладают морозы, нуждаются в высокой непроницаемости, коррозионной стойкости и морозостойкости. Особенно это относится к территории Крайнего Севера с суровым климатом, где бетонные изделия и конструкции подвергаются 400–600 циклам замораживания и оттаивания в год [3].

Одним из основных параметров для выдерживания различных изменений окружающей среды является структура внутренних пор бетона, а определяющим показателем морозостойкости бетонов – соотношение объема интегральных (открытых) и условно-замкнутых пор, т. е. чем больше это соотношение, тем выше морозостойкость у бетона. Например, при водопоглощении бетона при циклическом замораживании образуются капиллярные поры вследствие кристаллизации гелевидных фаз. Образовавшаяся капиллярная пористость увеличивает содержание льда при охлаждении, формируются макрокапиллярные поры [4]. Капиллярные поры в структуре бетона являются дефектом, негативно влияющим на его свойства, особенно на коррозионную стойкость и морозостойкость. Такая пористость обычно образуется вследствие увеличения водоцементного отношения бетонной смеси [5].

Воздухововлекающие добавки

Обеспечение морозостойкости бетона в настоящее время связано в основном с воздухововлечением с помощью добавок, которые создают в бетоне систему условно-замкнутых пор. Механизм действия порообразующих и воздухововлекающих добавок в структуре бетона является достаточно сложным процессом. В статье [6] исследователи считают, что для марки по морозостойкости F₂₃₀₀ необходимо обеспечить прочность

бетона свыше 40 МПа с обязательным применением воздухововлекающей добавки. С введением воздухововлекающих и пластифицирующих добавок и с повышением морозостойкости улучшается качество бетона.

Согласно статье [7], для воздухововлечения в высококачественных мелкозернистых бетонах необходимо использовать такие добавки, которые обеспечили бы образование воздушных пузырьков наименьшей крупности. Такие поры имеют большую удельную поверхность на границе раздела фаз «воздух – жидкость», которая энергетически и химически активно воздействует на процесс гидратации в объеме поризованных смесей.

При затворении бетона водой введенные в состав добавки начинают поглощать влагу и образовывать поры, заполненные водой. В дальнейшем в процессе гидратации цементного камня часть воды испаряется, часть переходит в связанное состояние, а также ее может не хватать для полной гидратации цемента. Вода, поглощенная добавкой, в этом случае будет служить источником подпитки, а освободившиеся от этой воды поры будут условно-замкнутыми, т. е. могут служить как резервные поры для повышения морозостойкости изделий из бетона [8].

В качестве подпитывающей добавки применяются алюмосиликатные полые микросферы, минеральные наполнители. В статье [9] применяются алюмосиликатные полые микросферы в качестве носителей части воды затворения, которая поглощается внутрь микросфер физически и расходуется при необходимости в более поздние сроки твердения цементного камня для гидратации непрореагировавших частиц цемента. Полная реакция таких частиц дает плотную структуру бетона, которая лучше сопротивляется морозным воздействиям. Чтобы внутренний объем микросфер беспрепятственно заполнялся водой, исследователи [9] добивались обнажения (перфорирования) оболочек микросфер с помощью химического травления. Вода, проникая через эти наноразмерные отверстия (рис. 1), способна задерживаться внутри полых микросфер.

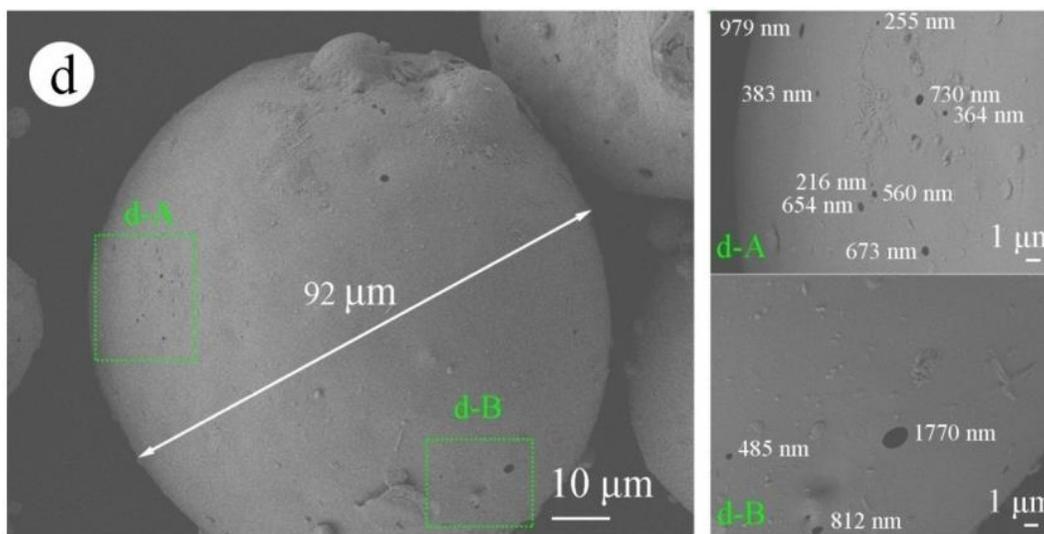


Рис. 1. Перфорированная ценосфера, где диаметры пор были отмечены локально [9]

У воздухововлекающих добавок, помимо положительного, есть и побочный эффект – небольшая пластификация смеси. Вовлечение воздуха сверх нормы может ухудшать, а в некоторых случаях улучшать свойства бетона. Ухудшение свойств

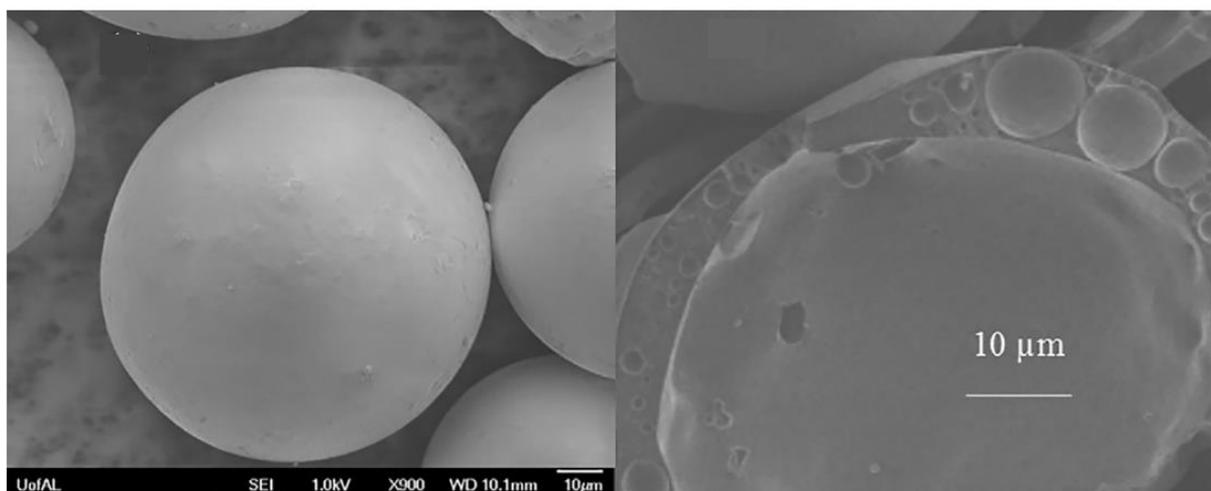
проявляется в снижении прочности при сжатии и изгибе, из-за этого воздухововлечение ограничивают по объему в бетонной смеси и оптимальным количеством считают 4–7 %. Воздух, вовлеченный в количестве 6 % в бетоне, способствует снижению прочности при сжатии на 36 %, а при изгибе на 18 % [10].

Алюмосиликатные полые микросферы

Помимо использования алюмосиликатных микросфер в лакокрасочных изделиях, в нефтегазовой отрасли и при производстве огнеупоров, их также применяют в качестве наполнителей как в легких, так и в тяжелых бетонах. В бетонах микросферы могут улучшить зерновой состав смеси, занимая свободные промежутки между зернами заполнителей и наполнителя, а также образовывать резервные поры, впитывать и отдавать часть воды затворения, как было описано ранее.

В статье [11] применяются алюмосиликатные полые микросферы в качестве демпфирующих добавок, которые способны снижать концентрацию напряжений на границе раздела фаз, что способствует торможению роста трещин в бетоне. Кроме того, в указанной статье использование данной добавки нацелено на повышение морозостойкости бетона. Повышение морозостойкости происходит за счет наличия микродефектов на стенках микросфер, как и в [9], которые способны пропускать воду под давлением в полое пространство и выступают в качестве резервных пор. В итоге испытаний выявлено, что бетонные образцы с алюмосиликатными полыми микросферами обладали морозостойкостью в 2–2,5 раза больше, чем образцы без них.

Алюмосиликатные полые микросферы (рис. 2) правильнее использовать в бетоне совместно с нанокремнеземом и суперпластификатором или гиперпластификатором, чем без них.



а

б

Рис. 2. Микроструктура ценосфер при наблюдении в сканирующий электронный микроскоп:
а – ценосфера с непроницаемой оболочкой;
б – пористая оболочка ценосферы [9]

Применение 10 % алюмосиликатных микросфер и 10 % нанокремнезема от массы микросфер может обеспечить наиболее оптимальную плотность и прочность бетона. Суперпластификатор в сочетании с микросферами и нанокремнеземом снижает силы аутогезии, что не дает частицам агломерироваться [12].

Так, большая часть оболочки микросфер будет взаимодействовать с продуктами гидратации цемента и нанокремнеземом и образовывать кристаллические структуры (гидросиликаты кальция в более поздние сроки), снижая количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (рис. 3а) [13–15]. Без добавления нанокремнезема на границе раздела фаз образуются пластинчатые кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и игольчатые кристаллы этtringита (рис. 3б). В статье [16] отмечается, что микросферы полностью преобразовываются примерно за два года, создавая на месте стенок микросфер новообразования с частичным сохранением полый формы (резервная пористость сохраняется) (рис. 3а). Вода при кристаллизации может вдавливаясь в эти резервные поры, не нанося при этом вреда самому бетону. Следовательно, с увеличением количества гидросиликатов кальция в структуре повышаются плотность и морозостойкость бетона.

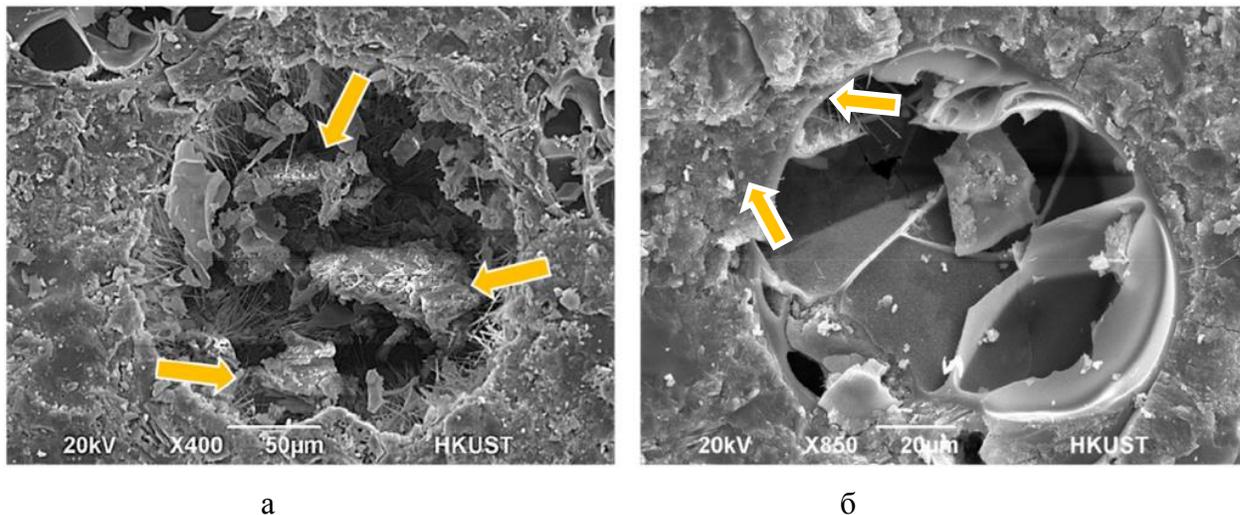


Рис. 3. Поведение алюмосиликатных микросфер в цементном тесте:
а – с содержанием нанокремнезема; б – без нанокремнезема [12]

Малозначительным недостатком алюмосиликатных микросфер в составе бетона является снижение его прочности на 5,2 % по сравнению с бездобавочным бетоном. Добавление микросфер в количестве 10–15 % от объема заполнителя создает в мелкозернистом бетоне необходимое количество резервных пор (4–7 %), обеспечивающее повышение морозостойкости в 2,5 раза [11]. Компенсировать потерю прочности (5,2 %) можно за счет введения оптимального количества нанокремнезема.

Сами микросферы имеют прочность в зависимости от размера от 4,3 до 10,0 МПа. Микросферы с большим средним размером имеют прочность ниже, чем микросферы, размеры которых меньше. Прочность микросфер достаточно высока, чтобы выдержать перемешивание в составе бетонной смеси и транспортирование [17].

При укладывании (виброуплотнении) бетонной смеси с алюмосиликатными микросферами в составе возникает вопрос: не будут ли микросферы всплывать на поверхность во время уплотнения бетонной смеси (виброуплотнения)? Приведа аналогию

с воздушными пузырьками, можно сказать, что скорость всплывания воздушных пузырьков из уплотняемой смеси увеличивается при их больших размерах и снижении вязкости. Можно ориентироваться на закон Стокса: скорость всплывания воздушного пузырька пропорциональна квадрату его радиуса и обратно пропорциональна вязкости смеси. Таким образом, для среднего размера алюмосиликатных микросфер примерная скорость всплывания будет рассчитана по формуле

$$v = \frac{2 r^2 g (\rho_p - \rho_f)}{9 \mu}, \text{ м/с,}$$

где v – установившаяся скорость частиц (частица движется вниз, если $\rho_p > \rho_f$, и вверх, если $\rho_p < \rho_f$), м/с; r – радиус частицы, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_p – плотность частиц, кг/м³; ρ_f – плотность жидкости, кг/м³; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с [18]. Примерная скорость движения микросфер с диаметром 50 мкм равна $4 \cdot 10^{-6}$ м/с, т. е. за 60 с виброуплотнения микросфера может переместиться на $0,24 \cdot 10^{-3}$ м.

Наравне с воздухововлекающими добавками и алюмосиликатными полыми микросферами, повышающими морозостойкость, в статье [9] предложены пенокерамические сферические гранулы, которые имеют в своей структуре условно-замкнутые поры. Применяемые пенокерамические сферические гранулы отличаются от алюмосиликатных микросфер как химическим составом, так и физико-механическими характеристиками. Однако процесс образования резервной пористости аналогичен образованию при применении алюмосиликатных микросфер. Пенокерамические гранулы также способствуют получению бетона с морозостойкостью более F300.

Пуццолановые добавки

При проектировании состава бетона вид цемента назначается в зависимости от требуемой марки по морозостойкости. При марке по морозостойкости F₁300 (F₂100) и выше необходимо назначать вид цемента, соответствующий требованиям, с содержанием трехкальциевого алюмината (С₃А) не более 7 % и минеральных добавок в виде шлака не более 15 %. Расход цемента назначается в зависимости от степени агрессивного воздействия на бетон и применяется не менее 300 кг/м³ [6].

Содержание в составе бетона суперпластификатора СП-1 и добавки АСЕ (добавка на основе эфиров поликарбоксилатов) в статье [4] позволило получить бетон с морозостойкостью F150. Только за счет добавления пуццолановой добавки с СП-1 можно получить F₂300, а с АСЕ свыше F₂500. Причиной этому является формирование гелеобразных гидратных фаз повышенной стабильности, связанной с взаимодействием АСЕ, гидроксида кальция и дальнейшим образованием гелеобразных фаз.

Установлено, что шлаки и известняк с высокой удельной поверхностью способны также положительно воздействовать на морозостойкость бетона [17].

Еще одним способом повышения морозостойкости бетонов является снижение проницаемости посредством механохимической активации частиц портландцемента до наноразмера. Данная характеристика играет большую роль в получении бетонов высокого качества с прочностью до 200 МПа, морозостойкостью до F2000 и водонепроницаемостью до W50 [1, 9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повысить морозостойкость бетона можно несколькими способами: введением воздухововлекающих добавок, введением в состав бетонной смеси алюмосиликатных полых микросфер, введением пенокерамических сферических гранул, механохимической активацией вяжущего вещества. Наиболее доступным, удобным и менее трудозатратным способом является добавление в состав бетонной смеси алюмосиликатных полых микросфер.

Установлено, что алюмосиликатные полые микросферы лучше проявляют себя при совместном использовании с нанокремнеземом и суперпластификатором или гиперпластификатором. Процесс повышения морозостойкости бетона заключается в том, что на месте оболочек микросфер образуются новые структуры, через которые вода при кристаллизации способна вдавливаясь под давлением в полое пространство, тем самым не нанося вреда структуре бетона.

Преимуществами использования алюмосиликатных полых микросфер является простота технологических операций, сохраняемость фиксированного количества пористости при перемешивании и транспортировании бетонной смеси за счет высокой прочности микросфер. Помимо этого, микросферы равномерно распределяются по всему объему бетона, что не затрудняет технологию производства бетонной смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Несветаило В.М. Многофункциональные бетоны нового поколения // *Технологии бетонов*. 2018. № 11-12. С. 46–49.
2. Чернышов Е.М. Морозная деструкция бетона. Часть 1. Механизм, критериальные условия управления // *Строительные материалы*. 2017. № 9. С. 40–46.
3. Усачев И.Н. Антикоррозионная защита гидротехнических сооружений на арктическом шельфе // *Безопасность энергетических сооружений*. 2016. № 1 (21). С. 96–111.
4. Шулдяков К.В., Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я. Высокоморозостойкий бетон без воздухововлечения // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-18-26>.
5. Шулдяков К.В., Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я. Структурный фактор долговечности бетона // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2020. Т. 20. № 1. С. 46–51.
6. Бруссер М.И., Подмазова С.А. Проектирование составов тяжелого и мелкозернистого бетона. Пути развития // *Бетон и железобетон*. 2021. № 2 (604). С. 3–7.
7. Черноусенко Г.И. О свойствах мелкозернистых поризованных бетонов // *Технологии бетонов*. 2019. № 5-6. С. 13–15.
8. Добщиц Л.М., Николаева А.А. Повышение стойкости бетонов к действию окружающей среды // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2019. № 3 (11). С. 18–27. DOI: 10.25686/2542-114X.2019.3.18.
9. Peiyuan Chen, Jialai Wang, Fengjuan Liu, Xin Qian, Ying Xu, Jin Li. Converting hollow fly ash into admixture carrier for concrete // *Construction and Building Materials*. 2018. № 159. P. 431–439.
10. Корсун А.М., Батяновский Э.И. К вопросу повышения морозостойкости цементного бетона за счет искусственно создаваемой пористости. *Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей II Международной научной конференции*. Новополюк. 2020. С. 246–255.

11. Ефимов Б.А. Морозостойкость тяжелых и мелкозернистых бетонов с добавкой полых алюмосиликатных микросфер // *Перспективы науки*. 2017. № 6 (93). С. 40–45.
12. Asad Hanif, Pavithra Parthasarathy, Hongyan Ma, Tianyuan Fan, Zongjin Li. Properties improvement of fly ash cenosphere modified cement pastes using nano silica // *Cement and Composites*. 2017. № 81. P. 35–48.
13. Патент РФ 2609784. *Состав смеси высокопрочного бетона* / Солдатова Н.И., Баранов И.М., Горбаш Д.В., Горожанкин И.Н., Юсупов Р.К.; Заявл. 23.06.2015. Опубл. 03.02.2017. Бюл. № 4.
14. Чумаков А.А., Яценко Е.А., Голованова С.П., Булгаков А.Г., Хольшемахер К. Прочность и морозостойкость специальных автодорожных бетонов // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2019. № 2. С. 55–59.
15. Калашников В.И., Тараканов О.В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // *Строительные материалы*. 2017. № 1-2. С. 62–67.
16. Vanessa Rheinheimer, Yunpeng Wu, Tao Wu, Kemal Celik, Junyan Wang, Laura De Lorenzis, Peter Wriggers, Min-Hong Zhang, Paulo J.M. Monteiro. Multi-scale study of high-strength low-thermal-conductivity cement composites containing cenospheres // *Cement and Concrete Composites*. 2017. № 80. P. 91–103.
17. Корчунов И.В., Потапова Е.Н. Разрушение цемента и бетона под действием хлоридов в условиях переменного замораживания и оттаивания // *Сухие строительные смеси*. 2020. № 3. С. 61–68.
18. Зоткин А.Г. Формирование воздушной пористости в мелкозернистом бетоне // *Технологии бетонов*. 2019. № 1-2. С. 20–24.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЖАБАРОВ Амирджон Султонджонович – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: volnik_amir@mail.ru

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Джабаров А.С., Белов В.В. Способы создания резервной пористости в бетоне для улучшения морозостойкости // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 1 (13). С. 13–22.

**WAYS TO CREATE RESERVE POROSITY IN CONCRETE
TO INCREASE FROST RESISTANCE**

A.S. Dzhabarov, V.V. Belov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The durability of concrete depends on a number of factors, in particular its frost resistance and permeability. The article discusses ways to improve such an important characteristic of concrete as frost resistance (the ability to withstand alternating freezing and thawing in a water-saturated (solution) state without the formation of defects). Increasing the frost resistance of concrete is carried out by introducing air-entrapping and pozzolan additives, aluminosilicate microspheres into the concrete mixture. In many of the works reviewed, it is noted that the superplasticizer used in conjunction with the above additives improves their effect on cement stone and concrete. In this paper, the effect of aluminosilicate hollow microspheres on structure formation in cement stone and the mechanism of increasing frost resistance with their help is considered in more detail.

Keywords: hollow aluminosilicate microspheres, frost resistance, mechanochemical activation, superplasticizer, additive, reserve porosity, strength, density.

REFERENCES

1. Nesvetailo V.M. Multifunctional concretes of a new generation. *Technologii betonov*. 2018. No. 11-12, pp. 46–49. (In Russian).
2. Chernyshov E.M. Frosty destruction of concrete. Part 1. Mechanism, critical conditions of management. *Stoitel'nye materialy*. 2017. No. 9, pp. 40–46. (In Russian).
3. Usachev I.N. Anticorrosive protection of hydraulic structures on the Arctic shelf. *Bezopastnost' energeticheskikh sooruzheniy*. 2016. No. 1 (21), pp. 96–111. (In Russian).
4. Shuldyakov K.V., Trofimov B.Ya., Kramar L.Ya. High-frost-resistant concrete without air entrainment. *Stoitel'nye materialy*. 2020. No. 6, pp. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-18-26>. (In Russian).
5. Shuldyakov K.V., Trofimov B.Ya., Kramar L.Ya. Structural factor of concrete durability. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Stroitel'stvo i arkhitektura»*. 2020. Vol. 20. No. 1, pp. 46–51. (In Russian).
6. Brusser M.I., Podmazova S.A. Design of compositions of heavy and fine-grained concrete. Development ways. *Beton i zhelezobeton*. 2021. No. 2 (604), pp. 3–7. (In Russian).
7. Chernousenko G.I. On the properties of fine-grained porous concretes. *Technologii betonov*. 2019. No. 5-6, pp. 13–15. (In Russian).
8. Dobschits L.M., Nikolaeva A.A. Increasing the resistance of concrete to the environment. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Ser.: Materialy. Konstrukzii. Technologii*. 2019. No. 3 (11), pp. 18–27. DOI: 10.25686/2542-114X.2019.3.18. (In Russian).
9. Peiyuan Chen, Jialai Wang, Fengjuan Liu, Xin Qian, Ying Xu, Jin Li. Converting hollow fly ash into admixture carrier for concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. No. 159, pp. 431–439.
10. Korsun A.M., Batyanovskiy E.I. On the issue of increasing the frost resistance of cement concrete due to artificially created. *Architectural and Construction Complex: Problems,*

Prospects, Innovations: Electronic Collection of Articles of the II International Scientific Conference. Novopolotsk. 2020, pp. 246–255. (In Russian).

11. Efimov B.A. Frost resistance of heavy and fine-grained concrete with the addition of hollow aluminosilicate microspheres. *Perspektivy nauki.* 2017. № 6 (93), pp. 40–45. (In Russian).

12. Asad Hanif, Pavithra Parthasarathy, Hongyan Ma, Tianyuan Fan, Zongjin Li. Properties improvement of fly ash cenosphere modified cement pastes using nano silica. *Cement and Composites.* 2017. No. 81, pp. 35–48.

13. Patent RF 2609784. *Sostav smesi visokoprochnogo betona* [The composition of the mixture of high-strength concrete]. Soldatova N.I., Baranov I.M., Gorbash D.V., Gorozhankin I.N., Yusupov R.K.; Declared 23.06.2015. Published 03.02.2017. Bulletin No. 4. (In Russian).

14. Chumakov A.A., Yatsenko E.A., Golovanova S.P., Bulgakov A.G., Holshemacher K. Strength and frost resistance of special road concretes. *Izvestiya vusov. Severo-Kavkazskiy region. Tehnicheskiye nauki.* 2019. No. 2, pp. 55–59. (In Russian).

15. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V. On the use of complex additives in new generation concretes. *Stoitel'nye materialy.* 2017. No. 1-2, pp. 62–67. (In Russian).

16. Vanessa Rheinheimer, Yunpeng Wu, Tao Wu, Kemal Celik, Junyan Wang, Laura De Lorenzis, Peter Wriggers, Min-Hong Zhang, Paulo J.M. Monteiro. Multi-scale study of high-strength low-thermal-conductivity cement composites containing cenospheres. *Cement and Concrete Composites.* 2017. No. 80, pp. 91–103.

17. Korchunov I.V., Potapova E.N. Destruction of cement and concrete under the action of chlorides in conditions of alternating freezing and thawing. *Suhie stroitel'nii smesy.* 2020. No. 3, pp. 61–68. (In Russian).

18. Zotkin A.G. Formation of air porosity in fine-grained concrete. *Tekhnologii betonov.* 2019. No. 1-2, pp. 20–24. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

DZHABAROV Amirdzhon Sultondzhonovich – Postgraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: volnik_amir@mail.ru

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Dzhabarov A.S., Belov V.V. Ways to create reserve porosity in concrete to increase frost resistance // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 1 (13), pp. 13–22.