



Параметры, влияющие на стойкость бетонов к агрессивным средам

¹**РЯБКОВА Марина Петровна**, к.т.н., старший преподаватель, marina170807@mail.ru,

¹**БАЙДЖАНОВ Джумагельды Омарович**, д.т.н., профессор, bdo3@yandex.ru,

¹**АБДУЛЛАЕВА Айғаным Бейбітқызы**, магистрант, abdullaeva_02@mail.ru,

¹***ХАН Максим Александрович**, магистр, старший преподаватель, han_maks@mail.ru,

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,
пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Приводятся данные по улучшению стойкости бетона к агрессивным средам. Проведены теоретические и практические исследования по выявлению причин стойкости различных бетонов к агрессивным средам. Исследованы способы повышения прочности бетонов на различных вяжущих. Изучено влияние макро- и микропор на стойкость бетона. Установлено что бетоны, в состав которых входят шлак или щелочные компоненты, проявляют более низкую капиллярную пористость по сравнению с материалами, основанными на портландцементе. Эта характеристика способствует снижению проницаемости и повышению устойчивости материала.

Ключевые слова: бетон, агрессивная среда, стойкость бетона, пористость, макроструктура, микроструктура, коррозионная стойкость.

Введение

Одним из ключевых вопросов, поставленных перед Правительством Республики Казахстан, является задача комплексного использования природных ресурсов. В документе «Основные направления экономи-

ческого и социального развития до 2025 года» подчеркивается важность решения ряда проблем в области естественных и теоретических наук, в том числе «разработка химико-технологических процессов для получения новых веществ и материалов с

определенными свойствами».

В различных отраслях экономики, таких как промышленность, транспорт и сельское хозяйство, широко используются различные покрытия и изделия, подвергающиеся воздействию органически агрессивных сред. Особенно уязвимы к быстрому разрушению покрытия полов в промышленных зданиях.

Создание материалов из местного сырья, которое не является дефицитным, обладающих повышенной устойчивостью к органическим средам, могло бы сократить временные потери из-за простоя оборудования и способствовать увеличению объемов строительства.

Исследования по созданию бетонов, устойчивых к воздействию органических сред, активно проводятся учеными как в странах СНГ, так и за рубежом. Результаты работ, таких как исследования Васильева Н.В., Дементьева Г.К., Иванова Ф.М., Ратинова В.Б., Ребиндера П.А., Робертса С., Эванса В. и других ученых, внесли значительный вклад в понимание основных факторов, влияющих на стойкость портландцемента в органических кислотах, поэтому было предложено заменить их полимербетонами. Однако использование полимербетонов требует сложной технологии и применения дефицитных токсичных смол, что противоречит санитарным нормам многих отраслей промышленности.

Из перспективных материалов для использования в условиях воздействия органических сред особенно выделяются те, которые обладают минимальной капиллярной пористостью и содержат продукты гидратации с пониженной растворимостью в пресной воде и кислотных растворах. Сюда относятся, например, шлакощелочные вяжущие и бетоны.

Исследования по коррозионной стойкости шлакощелочных бетонов в различных средах проведены Глуховским В.Д., Гончаровым В.В., Ильиным В.П., Саввиной Ю.А. и др. Анализ этих работ подчеркивает, что наиболее полные исследования стойкости шлакощелочных вяжущих и бетонов проведены в минеральных средах. Эти исследования свидетельствуют о высоких эксплуатационных характеристиках шлакощелочных вяжущих и бетонов при воздействии коррозионных факторов в минеральных кислотах, что обусловлено структурными особенностями материалов на макро- и микроуровнях.

При анализе влияния основных факторов на стойкость цемента и бетона в органических средах выделяют две группы сред. Первая группа включает среды, которые не взаимодействуют химически с цементным камнем (например, нефтяные среды), а вто-

рая группа включает среды, вступающие в химическое взаимодействие с цементным камнем, такие как кислые среды и среды, возникающие в пищевой промышленности.

Проведенный анализ основных факторов, влияющих на стойкость материалов в органических средах в обеих группах на примере бетонов на портландцементе выявил, что стойкость бетонов в кислых средах зависит от состава и растворимости новообразованных веществ, а также растворимости продуктов взаимодействия. Исследования по коррозионной стойкости бетона и железобетона в кислых средах представлены работами таких ученых, как Иванов Ф.М., Кинд В.В., Москвин В.М., Ратинов В.Б. и др. В этих исследованиях разработана теория стойкости бетона, зависящая от растворимости и характера продуктов взаимодействия бетона с кислотой.

При этом стоит отметить, что в случае хранения портландцемента в минеральных и органических кислотах происходит химическое взаимодействие с гидроксидом кальция, а затем с гидросиликатами и гидроалюминатами кальция, формируя кальциевые соли [1]. Необходимо подчеркнуть, что гидроксид кальция, играющий ключевую роль в структуре цементного камня, подвергается разрушению под воздействием кислот, приводя к быстрому нарушению структуры. Этот процесс сопровождается снижением концентрации ионов OH^- , что приводит к уменьшению щелочности жидкой фазы в порах цементного камня. В данном контексте ионы OH^- при воздействии кислот связываются с катионами водорода, образуя слабо диссоциированную воду [2].

Исследованиями было установлено, что с увеличением растворимости продуктов реакции портландцемента с минеральными кислотами увеличивается скорость процессов коррозии цементного камня [1, 3-5]. Напротив, при образовании малорастворимых продуктов реакции с гелекристаллической структурой, коррозия замедляется и определяется скоростью диффузии агрессивных ионов через слой продуктов коррозии вглубь бетона. Это объясняется особенностями микро- и макроструктуры шлакощелочных вяжущих и бетонов на их основе.

Открытие гидравлических вяжущих систем в Казахском институте стратегических исследований под руководством Глуховского В.Д. позволило разработать шлакощелочные бетоны с высокими прочностными и эксплуатационными свойствами [6, 7]. Эти свойства обусловлены особенностями состава новообразований продуктов гидратации и их структуры.

Основным отличием шлакощелочных вя-

жущих от портландцемента является отсутствие в их продуктах гидратации гидроксида кальция и высокоосновных гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция, которые имеют повышенную растворимость в пресной воде и кислых средах. Продукты гидратации шлакощелочных вяжущих включают низкоосновные гидросиликаты $\text{CSH}(\text{B})$, кремниевую кислоту, смешанные щелочно-щелочноземельные соединения, а также щелочные гидросиликаты, состав которых зависит от минералогического и химического состава используемых шлаков. Например, на основных шлаках с содержанием Al_2O_3 в количестве 5-6% формируются кальциевые и кальциево-натриевые гидроалюмосиликаты, такие как жисмондин, фожазит и томсонит. На нейтральных, с содержанием $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 10\%$, и кислых шлаках, Al_2O_3 до 17%, образуются натриевые гидроалюмосиликаты, такие как гидронефелин, натролит, паргонит и анальцит [8, 9].

На основе проведенных исследований был выявлен процесс деструкции алюмокремнекислородного каркаса минералов молотых шлаков. Этот процесс обусловлен каталитическим воздействием щелочей, приводящим к разрыву ковалентных связей Si-O-Si и Al-O-Si . Этот механизм аналогичен процессу, который происходит при переходе кремнезема и глинозема в гидратные формы, с последующим формированием тиксотропных структур. Эти структуры являются основой для развития конденсационно-кристаллизационных процессов в твердеющей системе.

Активность шлакощелочных вяжущих в испытаниях в растворе, при соотношении вяжущее: песок в пределах 30...120 МПа, изменяется в зависимости от состава шлака, природы щелочного компонента и условий твердения [10]. Исследования показывают, что интенсивность нарастания прочности цемента, так же, как и их активность, тесно связана с указанными факторами [11].

Отличительной особенностью гидратации и твердения шлакощелочных вяжущих систем и бетонов на их основе является взаимодействие щелочного компонента вяжущего практически со всеми силикатными и алюмосиликатными частицами мелкого заполнителя и с зёрнами песка (по поверхности), особенно при тепловлажностной обработке. Полученные новообразования обладают гидравлическими вяжущими свойствами и, как показывают исследования, активно участвуют в формировании связующего вещества, равнозначно шлаковым материалам.

Шлакощелочные цементы с добавками глины проявляют повышенную активность,

обусловленную увеличением степени связывания щелочей и образованием дополнительного резерва продуктов гидратации [12]. Новообразования продуктов гидратации таких цементов содержат в 1,5...2 раза меньше свободной щелочи по сравнению с обычными шлакощелочными системами. При добавке каолиновой и бентонитовой глины образуются дополнительные продукты, такие как анальцит и гидронефелин, а при введении монтмориллонита и артемовской глины появляются натриево-кальциевый гидросиликат $(\text{Na}, \text{Ca}) \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Распределение макропор и микрокапилляров в шлакощелочном камне заранее определяет высокую морозостойкость и повышенные эксплуатационные свойства материалов. Исследования Величко Т.П. показали, что параметр, характеризующий радиус крупных пор в шлакощелочном бетоне, зависит от природы щелочного компонента. Например, в бетонах на основе шлаков и гидроксида натрия, а также кислого шлака и карбоната натрия объем крупных пор с эффективным радиусом более 0,1 см такой же, как у бетона на портландцементе марки 400 и в 1,5 раза больше, чем у бетона на портландцементе марки 600. При использовании метасиликата натрия, в качестве щелочного компонента, радиус крупных пор в бетоне в 1,5...2 раза меньше, независимо от вида шлака.

Объем замкнутых пор и пустот в бетоне с различными шлаками и раствором метасиликата натрия изменяется в пределах 0,5...0,8%, что почти в 2 раза меньше, чем у бетона, в составе вяжущего содержащего гидроксид натрия, и немного меньше, чем в портландцементных бетонах.

По данным [12], адсорбционная характеристика, выраженная как отношение микропористости к капиллярной пористости, в шлакощелочном камне оказывается меньше, чем в портландцементном камне на 29,5%. Кроме того, капиллярная пористость шлакощелочного камня ниже по сравнению с портландцементным, хотя этот показатель значительно зависит от используемого щелочного компонента. Например, в составах с метасиликатом натрия и различными шлаками капиллярная пористость вдвое меньше, чем в составах с едким натром. Это согласуется с данными, полученными в ходе проведенных исследований стойкости шлакощелочных мелкозернистых бетонов в некоторых органических средах.

Согласно исследованиям Сикорского О.Н., шлакощелочные мелкозернистые бетоны на основе основных шлаков, раствора соды и едкого натра, хранившиеся в органических низкомолекулярных кислотах, про-

являют высокую стойкость, превосходящую стойкость портландцемента. Это объясняется отсутствием свободного гидроксида кальция и наличием более низкоосновных вяжущих с меньшей растворимостью продуктов гидратации по сравнению с портландцементом.

Ориентируясь на методику исследования Пашкова И.А., была проанализирована стойкость шлакощелочных мелкозернистых бетонов, созданных на основе основного шлака и раствора кальцинированной соды, которые хранились в бензине, 20%-ном растворе сахара, а также в уксусной и молочной кислотах.

В бензине бетоны данного состава не потеряли свою прочность, и разрушений не наблюдалось. После хранения в 20%-ном растворе сахара также не было обнаружено разрушений в шлакощелочном мелкозернистом бетоне. Также установлена высокая стойкость мелкозернистого шлакощелочного бетона в органических слабых кислотах, таких как уксусная и молочная. Это объясняется тем, что эти слабые кислоты нейтрализуют свободную щелочь в теле бетона и почти не влияют на новообразования.

Таким образом, можно сделать вывод что особенности микро- и макроструктуры шлакощелочных вяжущих и бетонов, а также результаты исследования их стойкости, предполагают возможность создания составов шлакощелочных бетонов с повышенной устойчивостью в разнообразных органических агрессивных средах. Расширение применения шлакощелочных вяжущих и бетонов, основанных на шлаках с разной основностью и различных щелочных ком-

понентах в промышленности, в сочетании с отсутствием данных о стойкости таких материалов в углеводородных и органических высокомолекулярных средах, ставит перед исследованиями ряд задач.

Заключение

Анализ имеющихся зарубежных и отечественных разработок и данных, полученных в ходе лабораторных исследований позволяет сформулировать следующее:

1. Шлакощелочные бетоны демонстрируют более низкую капиллярную пористость по сравнению с бетонами на портландцементе. Это свойство способствует уменьшению проницаемости и повышению устойчивости материала.

2. Сцепление между вяжущими и заполнителем в шлакощелочных бетонах усилено, что является следствием их химического взаимодействия. Это улучшенное сцепление способствует повышению прочности и стойкости к воздействию агрессивных сред.

3. Шлакощелочные вяжущие содержат в своем составе новообразования продуктов гидратации с более низкой основностью по сравнению с портландцементом. Эти соединения обладают меньшей растворимостью, что может способствовать повышению устойчивости к агрессивным средам.

4. Размеры пор и капиллярная пористость шлакощелочных вяжущих и бетонов зависят от минералогического и химического состава используемого шлака, а также от типа щелочного компонента. Это обстоятельство может оказывать существенное влияние на их микро- и макроструктуру, влияя на общую коррозионную стойкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beck, Matthias. Memorandum: Corrosion protection in structural engineering. Bautechnik, 8 (100), 2023, Pp. 483-493. DOI 10.1002/bate.202300068
2. Fan Wei, Zhuge Yan, Ma Xing, Chow Christopher W.K., Gorjian Nima. Feasibility of Using the Hollow Glass Microsphere to Develop Lightweight CAC-GGBFS-Blended Strain-Hardening Cementitious Composites. Frontiers in Materials. Volume 829, 2021, Article number No. 752720. DOI 10.3389/fmats.2021.752720
3. Hou Pengkun, Wang Xinming, Zhou Xiangming, Cheng Xin, Shah Surendra P. Regulations on the hydration, morphology, and sulfate-attack resistivity of C3A with micro/nano-silica particles. Construction and Building Materials, Volume 32421, 2022, Article number No. 126388. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.126388
4. Плотников В.В. Химия вяжущих материалов и бетонов: Справочник. – М.: Издательство «АСВ». 2015. – 400 с.
5. Гайдукова, Н.Г. Химия в строительстве: учебное пособие для вузов / Н.Г. Гайдукова, И.В. Шабанова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2023. – 256 с.
6. Abdelmelek Nabil, Lubloy Eva, Flexural strength of silica fume, fly ash, and metakaolin of hardened cement paste after exposure to elevated temperatures. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 13 (147), 2022, Pp. 7159-7169. DOI 10.1007/s10973-021-11035-3
7. Айменов Ж.Т., Сарсенбаев Б.К., Алдияров Ж.А., Айменов А.Ж. Применение шлакощелочных вяжу-

щих для бетонов в условиях сухого жаркого климата // Вестник науки Южного Казахстана. 2020. 2 (10). С. 13-20.

8. Юхневский, П.И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов / П.И. Юхневский. – Минск: БНТУ, 2013. – 310 с
9. Степанова В.Ф. Долговечность бетона: Учебное пособие для вузов – М., 2014. – 126 с.
10. Химия цемента и вяжущих веществ: Учебное пособие / Е.И. Шмитко, А.В. Крылова, В.В. Шаталова. – СПб.: Проспект Науки, 2018. – 208 с.
11. Строительные материалы и изделия: учеб. пособие / В.С. Руднов [и др.]; Под общ. ред. доц., канд. техн. наук И.К. Доманской. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 203 с.
12. Wang Huailiang, Wu Yuhui, Wang Lang, Chen Huihua, Cheng Baoquan. Properties of a lightweight fly ash-slag Alkali-activated concrete with three strength grades. Applied Sciences (Switzerland), 2 (11), 2021, Pp. 1-21. DOI 10.3390/app11020766.

Бетондардың агрессивті ортаға төзімділігіне әсер ететін параметрлер

¹**РЯБКОВА Марина Петровна**, т.ғ.к., аға оқытушы, marina170807@mail.ru,

¹**БАЙДЖАНОВ Джумагельды Омарович**, т.ғ.д., профессор, bdo3@yandex.ru,

¹**АБДУЛЛАЕВА Айғаным Бейбітқызы**, магистрант, abdullaeva_02@mail.ru,

¹***ХАН Максим Александрович**, магистр, аға оқытушы, han_maks@mail.ru,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Бетонның агрессивті ортаға төзімділігін жақсарту туралы мәліметтер келтірілген. Әртүрлі бетондардың агрессивті ортаға төзімділігінің себептерін анықтау үшін теориялық және практикалық зерттеулер жүргізілді. Әр түрлі байланыстырғыш бетондарының беріктігін арттыру жолдары зерттелді. Макро және микропоралардың бетонның беріктігіне әсері зерттелді. Құрамында қож немесе сілтілі компоненттер бар бетондар портландцементке негізделген материалдармен салыстырғанда капиллярлық кеуектіліктің төмендігін көрсететіні анықталды. Бұл сипаттама өткізгіштіктің төмендеуіне және материалдың тұрақтылығының жоғарылауына ықпал етеді.

Кілт сөздер: бетон, коррозиялық орта, бетон беріктігі, кеуектілік, макроқұрылым, микроқұрылым, коррозияға төзімділік.

Parameters Affecting the Resistance of Concrete to Aggressive Environments

¹**RYABKOVA Marina**, Cand. of Tech. Sci., Senior Lecturer, marina170807@mail.ru,

¹**BAIDZHANOV Dzhumageldy**, Dr. of Tech. Sci., Professor, bdo3@yandex.ru,

¹**ABDULLAYEVA Aiganym**, Master's Student, abdullaeva_02@mail.ru,

¹***KHAN Maxim**, Master's Degree, Senior Lecturer, han_maks@mail.ru,

¹NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. Provides data on improvement of concrete resistance to aggressive media. Theoretical and practical researches on revealing the reasons of resistance of various concretes to aggressive media are carried out. Methods of increasing the strength of concrete on different binders are investigated. The influence of macro- and micropores on the resistance of concrete has been studied. It is established that concretes with slag or alkaline components show lower capillary porosity in comparison with materials based on Portland cement. This characteristic helps to reduce permeability and increase the stability of the material.

Keywords: concrete, aggressive environment, concrete resistance, porosity, macrostructure, microstructure, corrosion resistance.

REFERENCES

1. Beck, Matthias. Memorandum: Corrosion protection in structural engineering. Bautechnik, 8 (100), 2023, Pp. 483-493. DOI 10.1002/bate.202300068
2. Fan Wei, Zhuge Yan, Ma Xing, Chow Christopher W.K., Gorjian Nima. Feasibility of Using the Hollow Glass Microsphere to Develop Lightweight CAC-GGBFS-Blended Strain-Hardening Cementitious Composites. Frontiers in Materials. Volume 829, 2021, Article number No. 752720. DOI 10.3389/fmats.2021.752720
3. Hou Pengkun, Wang Xinming, Zhou Xiangming, Cheng Xin, Shah Surendra P. Regulations on the hydration, morphology, and sulfate-attack resistivity of C3A with micro/nano-silica particles. Construction and Building Materials, Volume 32421, 2022, Article number No. 126388. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.126388
4. Plotnikov V.V. Khimiya vyazhushchikh materialov i betonov [Chemistry of binders and concretes]: Spravochnik. – Moscow: Izdatelstvo «ASV». 2015. – 400 p.
5. Gaydukova, N.G. Khimiya v stroitelstve: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Chemistry in construction: textbook for universities] / N.G. Gaydukova, I.V. Shabanova. – 2-ye izd., ispr. i dop. – Moscow: Izdatelstvo Yurayt, 2023. – 256 p.
6. Abdelmelek Nabil, Lubloy Eva, Flexural strength of silica fume, fly ash, and metakaolin of hardened cement paste after exposure to elevated temperatures. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 13 (147), 2022, Pp. 7159-7169. DOI 10.1007/s10973-021-11035-3
7. Aymenov Zh.T., Sarsenbayev B.K., Aldiyarov Zh.A., Aymenov A.Zh. Primeneniye shlakoshchelochnykh vyazhushchikh dlya betonov v usloviyakh sukhogo zharkogo klimata [Use of slag-alkali binders for concrete in dry hot climates] // Vestnik nauki Yuzhnogo Kazakhstana. 2020. 2 (10). Pp. 13-20.
8. Yukhnevskiy, P.I. Vliyaniye khimicheskoy prirody dobavok na svoystva betonov [Influence of chemical nature of additives on concrete properties] / P.I. Yukhnevskiy. – Minsk: BNTU, 2013. – 310 p.
9. Stepanova V.F. Dolgovechnost betona: Uchebnoye posobiye dlya vuzov [Durability of Concrete: Textbook for Universities]. – Moscow, 2014. – 126 p.
10. Khimiya tsementa i vyazhushchikh veshchestv: Uchebnoye posobiye [Chemistry of cement and binders: Textbook] / Ye.I. Shmitko, A.V. Krylova, V.V. Shatalova. – Saint Petersburg: Prospekt Nauki, 2018. – 208 p.
11. Stroitelnyye materialy i izdeliya: ucheb. posobiye [Building materials and products: textbook] / V.S. Rudnov [i dr.]; Pod obshch. red. dots., kand. tekhn. nauk I.K. Domanskoy. – Yekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2018. – 203 p.
12. Wang Huailiang, Wu Yuhui, Wang Lang, Chen Huihua, Cheng Baoquan. Properties of a lightweight fly ash-slag Alkali-activated concrete with three strength grades. Applied Sciences (Switzerland), 2 (11), 2021, Pp. 1-21. DOI 10.3390/app11020766.