

Научная статья
УДК 691.32
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-628-638>
EDN: SOXLQT



УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕСТРУКЦИИ БЕТОНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

Н.М. Толыпина, Д.Ю. Данилов ✉

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

✉ ответственный автор
dimadan31@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные методы исследования коррозионного повреждения бетона достаточно длительные и трудоемкие, что затрудняет их применение. Это вызывает необходимость поиска новых подходов для исследования деструкции бетона под воздействием агрессивных сред. В настоящее время эффективно используется метод ультразвуковой диагностики для выявления различных структурных дефектов, однако возможность его применения для исследований коррозии бетона малоизученна. Восполнению этого пробела посвящена данная работа.

Материалы и методы. Использовали образцы бетона размером 2,5х2,5х10 см и 2,5х2,5х16 см различного состава (цемент: заполнитель=1:9, 1:7, 1:5). Контрольные образцы твердели в нормальных условиях, испытываемые образцы хранили в различных агрессивных средах. Образцы всех сред хранения подвергали периодическим испытаниям на приборе ультразвуковой диагностики «Пульсар-2.2». Параллельно определяли прочностные показатели, полученным разрушающим методом на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4, а также коэффициент стойкости.

Результаты. Установлена взаимосвязь между периодами роста, экстремумами и скачкообразными изменениями скорости прохождения ультразвуковых волн и этапами набора прочности, условиями твердения образцов, временными факторами. Показано, что ультразвуковая диагностика достаточно чувствительна к процессам, вызванным коррозионной деструкцией бетона, и позволяет получать достоверные данные, при этом прочность и коэффициент стойкости не всегда адекватно отражают развитие коррозионных процессов. Установлено, что применение ультразвуковой диагностики дает возможность повысить достоверность результатов исследований коррозии бетона.

Заключение. Использование метода УЗ-диагностики позволяет получить новые данные о процессах деструкции бетона под воздействием агрессивных сред, что дает возможность повысить достоверность результатов исследований коррозии бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ультразвуковая диагностика, коррозия бетона, агрессивная среда, скорость ультразвуковых волн, коррозионная стойкость, коэффициент стойкости, бетон

БЛАГОДАРНОСТЬ. Авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 19.06.2024; одобрена после рецензирования 27.07.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Толыпина Н.М., Данилов Д.Ю. Ультразвуковая диагностика деструкции бетона под воздействием агрессивных сред // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 628-638. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-628-638>

© Толыпина Н.М., Данилов Д.Ю., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-2-4-628-638>
EDN: SOXLQT

ULTRASONIC DIAGNOSTICS OF CONCRETE DESTRUCTION UNDER INFLUENCE OF CORROSION ENVIRONMENT

Natalia M. Tolypina, Dmitrii Yu. Danilov ✉

V.G. Shukhov Belgorod State Technological University
Belgorod, Russia

✉ corresponding author
dimadan31@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Modern methods of studying the corrosion damage of concrete are quite lengthy and time-consuming, which makes their use difficult. This necessitates the search for new approaches to study the destruction of concrete under the influence of aggressive media. Currently, the ultrasound diagnostic method is effectively used to identify various structural defects, but the possibility of its use for concrete corrosion studies is poorly understood. This work is devoted to filling this gap.

The methods of research. Concrete samples of 2.5x2.5x10 cm and 2.5x2.5x16 cm of various composition (cement: placeholder = 1:9, 1:7, 1:5). The control samples hardened under normal conditions, the test samples were stored in various aggressive environments. The samples of all storage media were subjected to periodic tests on the Pulsar-2.2 ultrasound diagnostic device. In parallel, the strength parameters obtained by the destructive method on the PGM-100MG4 hydraulic press, as well as the resistance coefficient, were determined.

Results. The relationship between the growth periods, extremes and abrupt changes in the velocity of passage of ultrasonic waves and the stages of strength gain, the conditions of hardening of samples, and time factors has been established. It is shown that ultrasound diagnostics is quite sensitive to the processes caused by the corrosion destruction of concrete and allows us to obtain reliable data, while the strength and coefficient of resistance do not always adequately reflect the development of corrosion processes. It has been established that the use of ultrasound diagnostics makes it possible to increase the reliability of the results of concrete corrosion studies.

Conclusion. The use of the ultrasound diagnostic method enables to obtain new data on the processes of concrete destruction under the influence of aggressive media, which makes it possible to increase the reliability of the results of concrete corrosion studies.

KEYWORDS: ultrasound diagnostics, concrete corrosion, corrosion environment, the speed of ultrasonic waves, corrosion resistance, the coefficient of durability, concrete

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude to the editorial board of the Russian Automobile and Highway Industry Journal and the reviewers of the article.

The article was submitted 19.06.2024; approved after reviewing .07.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Tolypina N.M., Danilov D.Yu. Ultrasonic diagnostics of concrete destruction under the influence of corrosion environment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 628-638. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-628-638>

© Tolypina N.M., Danilov D.Yu., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие методы исследований коррозионного повреждения бетона достаточно длительные и трудоемкие, они проводятся в лабораторных условиях с использованием большого количества испытуемых образцов, больших объемов периодически сменяемых агрессивных растворов [1, 2], что создает определенные трудности при проведении исследований. Это в свою очередь вызывает необходимость разработки и применения новых подходов к диагностике деструкции бетона при взаимодействии с агрессивной средой. Для определения разного рода показателей бетона используются весьма эффективно методы ультразвуковой диагностики¹ [3, 4, 5]. Они применяются для контроля прочности бетона [6, 7, 8], морозостойкости², определения структурных дефектов [9, 10, 11], трещинообразования [12, 13], деструкции бетона после пожара [14], водонепроницаемости [15, 16] и т.д. Основаны они на измерении времени, затрачиваемом ультразвуковыми волнами на прохождение пути от излучателя к приемнику. По изменению скорости прохождения УЗ-сигнала через бетон можно проследить за структурными изменениями, с ростом микродефектов в материале скорость УЗ-волн снижается. Большим достоинством УЗ-диагностики является возможность использования ультразвука непосредственно на исследуемых конструкциях без риска повредить их [6, 9]. Однако к настоящему времени вопрос о проведении исследований коррозии бетона с помощью ультразвукового метода малоизучен.

В этой связи целью работы является исследование возможности применения метода УЗ-диагностики для оценки деструкции бетона под воздействием агрессивных сред.

Задачи исследования:

1. При помощи метода ультразвуковой диагностики исследовать динамику набора прочности контрольных образцов бетона различного состава водного твердения.
2. Исследовать деструкцию бетона различного состава в агрессивных растворах сульфатов магния и натрия методом УЗ-диагностики.
3. Исследовать коррозионную стойкость бетона при воздействии агрессивных сред с

использованием показателей прочности и коэффициента стойкости.

4. Дать обоснование возможности применения УЗ-диагностики для исследования деструкции бетона при воздействии агрессивных сред.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для исследования коррозионной стойкости бетона были изготовлены образцы составов 1:9, 1:7, 1:5. Использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент» ($t_{н.схв}=230$ мин; НГ=26%, $C_3S=61,59\%$, $C_2S=14,2\%$, $C_3A=6,83\%$, $C_4AF=3,73\%$); гранитный щебень фракции 3–8 мм, верхний предел ограничен размерами образцов 2,5х2,5х10 см (ГОСТ 10180–2012); кварцевый песок производителя ООО «Пулмаркет» ($SiO_2=95\%$, $M_{кр}=2,15$, ГОСТ 8736–2014). Водоцементное отношение соответствовало нормальной консистенции по ГОСТ 310.4–81. Изготавливали балочки размером 2,5х2,5х10 см для испытаний на прочность разрушающим методом на лабораторном прессе ПГМ-100МГ4 и балочки 2,5х2,5х16 см для испытаний ультразвуковым методом с помощью измерителя времени и скорости распространения ультразвука «Пульсар-2.2», база прозвучивания 12 см. Образцы после 1 сут твердения расформовывали и помещали на 14 сут в камеру нормального хранения, после чего испытывали на прочность [2]. Затем образцы каждого состава делили на три группы: одну часть помещали в 1,5%-й раствор $MgSO_4$, вторую – в 1,5%-й раствор Na_2SO_4 ; третья группа – контрольные образцы, твердели в водопроводной воде. Образцы 2,5х2,5х10 см испытывали на прессе через 1, 3, 6 и 12 мес хранения в различных средах, в то время как образцы 2,5х2,5х16 см регулярно через каждые 2 недели диагностировались на приборе «Пульсар-2.2». Перед каждым испытанием образцы подвергали визуальному осмотру.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Проводились периодические испытания образцов методом ультразвуковой диагностики. На рисунке 1 представлены графики скорости прохождения УЗ-импульса в образцах различного состава, твердевших в воде. Составы бетона с разным соотношением цемент:заполнитель представлены в таблице 1.

¹ Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение. 1981. 240 с.

² Мирский К.В., Панчина А.А., Мирский В.А., Терешкин И.П. Скорость ультразвука как критерий морозостойкости цементного бетона // XLVI Огарёвские чтения: материалы научной конференции: В 3-х частях, Саранск, 6–13 декабря 2017 года. Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2018. С. 184–191.

Таблица 1
Составы бетона
Источник: составлено авторами.

Table 1
Concrete compositions
Source: compiled by the authors.

№	Цемент: заполнитель	Цемент, кг/м³	Щебень, кг/м³	Песок, кг/м³	Вода, л	В/Ц
1	1:9	220	1100	880	154	0,7
2	1:7	275	962,5	962,5	192,5	0,7
3	1:5	365	917,5	917,5	198	0,54

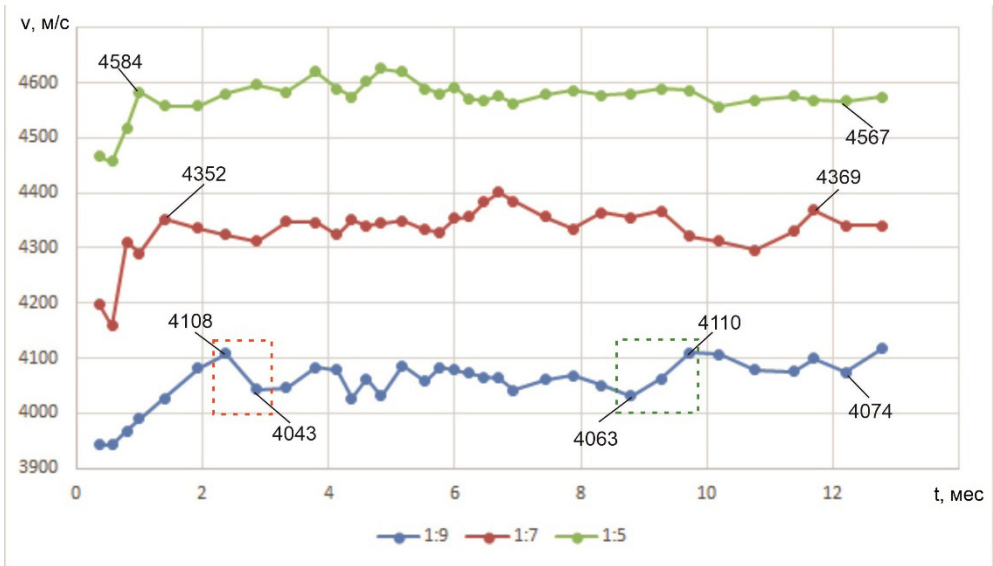


Рисунок 1 – Скорость прохождения УЗ-импульса в образцах бетона различного состава, твердевших в нормальных условиях
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The rate of passage of the ultrasonic pulse in concrete samples of various compositions, hardened under normal conditions
Source: compiled by the authors

Интенсивный рост скорости прохождения УЗ-импульса через образец состава 1:9 с минимальным расходом цемента продолжался в течение первых двух месяцев. После 2 мес твердения наблюдался спад скорости от 4108 до 4043 м/с, затем скачкообразные изменения скорости с большой амплитудой вплоть до 6 мес. Весь последующий период твердения амплитуда колебаний скорости и интервал между ними уменьшался, заметный подъем скорости до максимального уровня наблюдался к 10 мес (4110 м/с), однако не превышал значения, достигнутого на начальной стадии твердения.

После 10 мес твердения скорость УЗ-сигнала стабилизировалась.
Рост скорости прохождения УЗ-импульса через образец состава 1:7 на начальном этапе твердения наблюдался в течение 1,5 мес, в дальнейшем скорость почти не изменялась и разброс значений скорости находился в узком диапазоне вплоть до 6 мес. После 6 мес наблюдались колебания с тремя пиками в пределах 4300–4400 м/с с достаточно широким интервалом около 2 мес. Максимальное значение скорости УЗ (4401 м/с) было зафиксировано через 7 мес.

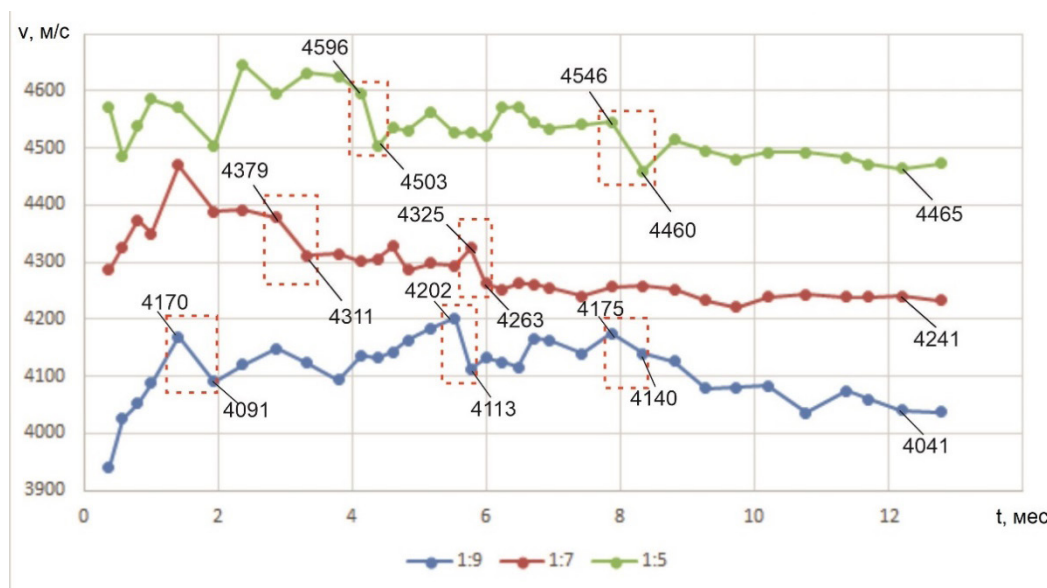


Рисунок 2 – Изменение скорости прохождения УЗ-импульса в образцах бетона различного состава, твердевших в 1,5%-м р-ре $MgSO_4$
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The change in the velocity of the ultrasonic pulse in concrete samples of various compositions solidified in 1.5% $MgSO_4$ solution
Source: compiled by the authors.

Самый быстрый рост скорости прохождения УЗ-импульса (в течение ≈ 1 мес) через образец наблюдался у состава 1:5 с наибольшим расходом вяжущего по сравнению с составами 1:9 и 1:7 (рисунок 1). Затем в интервале 4 и 6 мес наблюдались два слабых пика, колебания фиксировались от 4570 до 4620 м/с. Максимальное значение скорости УЗ-сигнала установлено в возрасте 5 мес (4626 м/с).

Сопоставляя данные, приведенные на рисунке 1, четко прослеживается зависимость амплитуды и частоты колебаний УЗ-сигнала в образцах от расхода цемента. Наиболее интенсивные колебания скорости УЗ-сигнала, а соответственно прочности, наблюдались у образца состава 1:9 с малым расходом вяжущего. С ростом содержания цемента от 1:9 к 1:5 амплитуда и частота колебаний затухают. Это свидетельствует о том, что в бетонах оп-

тимальных структур изменение амплитудных составляющих происходит менее интенсивно. У образцов с наибольшим содержанием вяжущего (1:5) колебания затухают раньше – после 6 мес твердения, со снижением расхода вяжущего период чередующихся скачков «подъем-падение» длится вдвое дольше. Следует отметить, что скачкообразный рост прочности бетонов является закономерным следствием непрекращающихся процессов гидратации, рекристаллизации, массопереноса и т.д. [17]. Интенсивность сбросов зависит от состава бетона, расхода цемента, В/Ц, условий твердения и др. Со временем интервалы между скачками увеличиваются, что связано с замедлением структурных и физико-химических процессов. Разброс значений прочности может достигать 15–20%³ [17].

³ Бабков В.В., Сахибгареев Р.Р. Потенциал структурообразования и самозалечивания цементных систем на поздних стадиях твердения // Наука и инновации в строительстве: сб. тр. Международного конгресса SIB-2008. Воронеж: ВГАСУ, 2008. Т. 1, кн. 2. С. 463–469.



Рисунок 3 – Диагностика корродированного образца состава 1:5, твердевшего 13 мес в 1,5%-м р-ре $MgSO_4$
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Diagnosis of a corroded sample of 1:5 composition, hardened for 13 months in 1.5% $MgSO_4$ solution
Source: compiled by the authors.

Наибольший интерес представляют графики изменения скорости УЗ-импульса в образцах, хранившихся в агрессивных средах. На графике скорости прохождения УЗ-импульса через образец состава 1:9, твердевшего в растворе сульфата магния (рисунок 2), можно выделить несколько этапов с характерным скачкообразным изменением скорости. Сначала до 1,5 мес образцы активно набирали прочность, что в полной мере прослеживается по росту скорости УЗ-сигнала. После прекращения набора прочности (2 мес) произошел резкий сброс скорости – с 4170 до 4091 м/с, который затем сменился подъемом скорости УЗ-сигнала, продолжавшимся до 6 мес и достижением максимального значения 4202 м/с. Затем отмечается два заметных сброса скорости УЗ-сигнала в 6 и 8 мес на фоне постепенного снижения вплоть до 13 мес.

На графике скорости прохождения УЗ-сигнала через образец состава 1:7 (см. рисунок 2) прослеживается иная зависимость. После

набора прочности до 1,5 мес происходит ступенчатое снижение скорости с заметными спадами через 3 мес (с 4379 до 4311 м/с) и 6 мес (с 4325 до 4263 м/с). После 6 мес скорость стабилизируется, достигая к 12 мес 4241 м/с, что является самым низким значением за исследуемый период и отражает общую тенденцию к снижению. Максимальное значение было зафиксировано в возрасте 1,5 мес (4470 м/с), что свидетельствует о преобладании позитивных структурирующих процессов над деструктивными на начальной стадии твердения.

График скорости прохождения УЗ-сигнала в образце состава 1:5 (см. рисунок 2) с максимальным содержанием цемента показывает скачкообразное изменение скорости на начальном этапе (до 3 мес), а затем ступенчатое снижение со сбросами в 4 мес (с 4596 до 4503 м/с) и 8 мес (с 4546 до 4460 м/с), после чего скорость стабилизировалась. Набор прочности длился примерно месяц, как и в воде. Максимальное значение (4647 м/с) зафиксировано в возрасте 2,5 мес. Проведение диагностики образца УЗ-прозвучиванием показано на рисунке 3.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что метод УЗ-диагностики проявляет достаточную чувствительность к изменениям структуры корродированных образцов, твердевших в растворе сульфата магния. Вид графиков скорости прохождения УЗ-сигнала в корродированных образцах отличается от аналогичных у образцов нормального твердения тем, что на фоне скачкообразных колебаний значений скорости УЗ происходит ступенчатое снижение, в то время как при твердении в воде колебания скорости УЗ-сигнала остаются на уровне, достигнутом на начальной стадии твердения.

Большое влияние на коррозионную стойкость оказывает проницаемость бетона. С повышением проницаемости бетона при снижении расхода вяжущего, скорость коррозии и деструкция бетона возрастают, что хорошо коррелируется с данными ультразвуковой диагностики в составах 1:5, 1:7, 1:9 (см. рисунок 2). В растворе сульфата магния коррозия развивается по механизму магниевой и сульфатной, деструкция бетона при этом обусловлена образованием продуктов: гипса, этtringита, брусита. Малорастворимые продукты гипс и этtringит кристаллизуются с увеличением объема твердой фазы, что сопровождается образованием трещин и разрушением структуры цементного камня.



Рисунок 4 – Внешний вид образцов, твердевших в 1,5%-м р-ре MgSO_4 1 и 12 мес.
 Состав: 1 – 1:9, 2 – 1:7, 3 – 1:5
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – The appearance of the samples solidified in 1.5% MgSO_4 solution for 1 and 12 months
 Composition: 1 – 1:9, 2 – 1:7, 3 – 1:5
 Source: compiled by the authors.

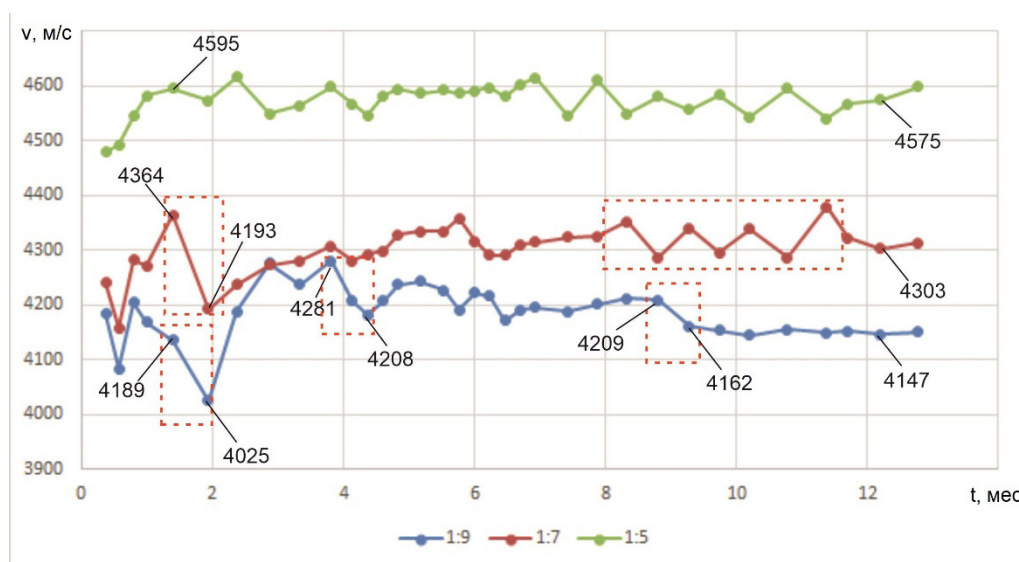


Рисунок 5 – Изменение скорости прохождения УЗ-импульса в образцах бетона различного состава, твердевших в 1,5%-м р-ре Na_2SO_4
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – The change in the velocity of the ultrasonic pulse in concrete samples of various compositions solidified in 1.5% Na_2SO_4 solution
 Source: compiled by the authors.

Поступление ионов магния из раствора приводит к образованию МН и М-S-H фазы, что отрицательно влияет на устойчивость гидросиликатов кальция и усиливает сульфатное воздействие.

Внешний вид образцов (рисунок 4) подтверждает приведенные экспериментальные данные. На поверхности образцов после 12 мес испытаний наблюдаются признаки разрушения:

выкрашивание углов и ребер балочек, особенно у образца 1:9 – появление каверн на гранях.

Растворы сульфата натрия менее агрессивны по отношению к бетону, процессы протекают по механизму сульфатной коррозии с образованием гипса и этtringита. Процессы деструкции бетона и, соответственно, показатели ультразвуковой диагностики имеют свои особенности.



Рисунок 6 – Внешний вид образцов, твердевших в 1,5%-м р-ре Na_2SO_4 1 и 12 мес.

Состав: 1 – 1:9, 2 – 1:7, 3 – 1:5

Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The appearance of the samples solidified in 1.5% Na_2SO_4 solution for 1 and 12 months

Composition: 1 – 1:9, 2 – 1:7, 3 – 1:5

Source: compiled by the authors.

У образца бетона состава 1:9, твердевшего в растворе Na_2SO_4 (рисунок 5), наблюдалось несколько спадов скорости УЗ-сигнала: первый – через 1 мес, разница составила 164 м/с (с 4189 до 4025 м/с), следующий спустя 4 мес – с 4281 м/с (что является максимальным за год значением) до 4208 м/с, последний через 9 мес – с 4209 м/с до 4162 м/с. Как видно, после первого спада скорости наблюдался дальнейший рост, но после 4 мес можно отметить устойчивую тенденцию к снижению скорости УЗ, что отражает преобладающее развитие деструктивных процессов в бетоне.

У образца состава 1:7 (см. рисунок 5) после спада скорости УЗ-сигнала через 1 мес твердения наблюдался непрерывный рост до 6 мес, в возрасте с 8 до 11 мес каждые две недели происходили циклические изменения показаний скорости УЗ, с колебаниями значений от 4280 до 4380 м/с, после чего скорость стабилизировалась примерно на уровне 4300 м/с. Скорость к 12 мес зафиксирована ниже величины, достигнутой в начале твердения.

У образца бетона состава 1:5 с максимальным содержанием вяжущего на графике скорости УЗ-импульса не наблюдается каких-либо резких скачков показаний, скорость поддерживается на стабильном уровне после первого месяца пребывания в агрессивном растворе. Несмотря на то, что с 7 по 11 мес присутствуют циклические изменения показателей, величина этих колебаний незначительна – максимальный перепад составил 60 м/с. Набор прочности продолжался 1 мес, как при твердении в воде.

Полученные данные скорости УЗ-импульса свидетельствуют о начавшихся процессах деструкции в образце состава 1:9 практически после 4–6 мес хранения в агрессивной среде и коррозионной устойчивости образцов составов 1:7 и 1:5, которые не продемонстрировали заметного снижения скорости. Это согласуется с известными положениями о влиянии вида агрессивной среды и проницаемости бетона на коррозионную устойчивость. Видимых признаков разрушения образцов (рисунок 6) не обнаружено.

Таким образом, результаты, полученные при помощи метода УЗ-диагностики, показали, что скорость прохождения УЗ-сигнала в образцах достаточно чувствительна к процессам деструкции, происходящим в бетоне под воздействием агрессивных сред, что довольно точно отражается количественными показателями. Данные скорости УЗ-сигнала адекватно отражают деструкцию бетона различного состава при смене вида агрессивного носителя, что хорошо согласуется с закономерностями физико-химических процессов отдельных видов коррозии.

Количественные показатели прочности образцов всех сред хранения приведены в таблице 2. Образцы бетона, помещенные в раствор сульфата натрия, набирали прочность до 6 мес с момента погружения в агрессивную среду, к 12 мес этот показатель снизился. В растворе сульфата магния у образцов составов 1:7 и 1:5 прочность начала снижаться уже к 6 мес, у образца состава 1:9 мало изменилась. К 12 мес все образцы показали снижение прочностных показателей.

Таблица 2
Прочность на сжатие образцов бетона различного состава и сред хранения
Источник: составлено авторами.

Table 2
Compressive strength of concrete samples of various compositions and storage media
Source: compiled by the authors.

Состав	Среда	Прочность на сжатие, МПа, в сроки твердения					Кст
		14 сут перед погружением	1 мес	3 мес	6 мес	12 мес	
1:9	вода	10,30	8,07	10,20	12,61	14,73	1
1:9	1,5%-й р-р $MgSO_4$		8,67	6,80	11,91	10,43	0,71
1:9	1,5%-й р-р Na_2SO_4		6,06	11,46	14,08	11,49	0,78
1:7	вода	17,26	22,50	20,05	22,23	22,80	1
1:7	1,5%-й р-р $MgSO_4$		20,75	26,60	21,38	18,04	0,79
1:7	1,5%-й р-р Na_2SO_4		21,66	18,69	19,86	19,46	0,85
1:5	вода	34,73	35,75	37,60	35,84	40,14	1
1:5	1,5%-й р-р $MgSO_4$		35,57	32,05	30,64	25,21	0,63
1:7	1,5%-й р-р Na_2SO_4		33,62	29,55	34,52	32,77	0,82

В качестве количественной характеристики кроме прочности использовали коэффициент стойкости (Кст), на основании которого можно судить об относительном изменении прочности образцов

$$K_{ст} = \frac{R_{сж.агр.ср.}}{R_{сж.вод.}}$$

где $R_{сж.агр.ср.}$ – прочность на сжатие образцов, твердевших в агрессивной среде; $R_{сж.вод.}$ – прочность на сжатие образцов, твердевших в воде.

$K_{ст}$ находился в пределах от 0,63 до 0,85, значения ниже 0,8 свидетельствуют о низкой коррозионной стойкости образцов бетона. Коэффициент стойкости образцов бетона всех исследуемых составов в растворе сульфата магния был ниже, чем в растворе сульфата натрия, что является аутентичным. Однако четкой корреляции между содержанием вяжущего и величиной $K_{ст}$ не прослеживается, хотя известно, что коррозионная стойкость бетона в большой степени определяется его проницаемостью, которая увеличивается по мере увеличения содержания заполнителя в бетонной смеси. Вызывает вопрос значение коэффициента стойкости $K_{ст}=0,63$ у бетона с наибольшим расходом вяжущего, состава 1:5. При этом приведенные на рисунке 3 данные не показывают резкого

снижения скорости прохождения УЗ-сигнала у образца данного состава, а следовательно, прочности к 12 мес испытаний в агрессивной среде. Полученные результаты в очередной раз подтверждают, что прочность и коэффициент стойкости не всегда позволяют адекватно судить о развитии коррозии. В этой связи применение параллельно со стандартными методами способа ультразвуковой диагностики при исследовании коррозии позволит повысить достоверность результатов исследований.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана взаимосвязь скорости, амплитуды и частоты колебаний УЗ-сигнала в образцах бетона в зависимости от состава и условий твердения. У образцов нормального твердения наблюдалось скачкообразное изменение скорости прохождения УЗ-сигнала через образец в течение всего срока испытаний, при этом сохранялся средний уровень значений скорости, достигнутый на начальной стадии твердения. С увеличением количества вяжущего в бетоне амплитуда и частота колебаний затухают, что является закономерным следствием протекающих физико-химических и структурирующих процессов в цементном камне.

Установлено, что показания скорости прохождения УЗ-сигнала реагируют на изменения структуры корродированных образцов, твердевших в агрессивных растворах сульфатов магния и натрия. Графики скорости прохождения УЗ-сигнала в образцах всех составов, твердевших в растворе сульфата магния, демонстрируют ступенчатое снижение на фоне скачкообразных колебаний. При воздействии менее агрессивного раствора сульфата натрия процессы деструкции бетона протекают по другому механизму, что фиксировалось данными скорости прохождения УЗ-сигнала. Полученные данные методом УЗ-диагностики адекватно отражают известные положения о влиянии вида агрессивной среды и проницаемости бетона на коррозионную стойкость.

Прочность и коэффициент стойкости не всегда могут демонстрировать реальное развитие коррозионного повреждения бетона, так как испытание в периоды сброса прочности может дать ошибочный результат, поэтому применять их следует с осторожностью. В этой связи целесообразно использовать наряду со стандартными методами испытаний коррозионной стойкости бетона метод ультразвуковой диагностики, который позволяет учитывать динамику развития прочности и давать обоснованную оценку конкретных внешних воздействий, что позволит повысить достоверность результатов исследований.

Использование метода УЗ позволяет получить новые данные о процессах микротрещинообразования при деструкции бетона под воздействием агрессивных сред. Его применение позволило зафиксировать колебания скорости (прочности), наблюдаемые через небольшие интервалы времени, которые не диагностируются при разрушающих методах исследования, применяемых эпизодически. Это обуславливает целесообразность дальнейшей проработки данной методики, чтобы наряду с традиционными методами на основе механических испытаний бетонных образцов получать достоверные данные о развитии сложных многостадийных процессах преждевременного разрушения бетона. Относительная простота, быстрота и достаточная точность делают рассмотренный метод весьма перспективным при проведении исследовательских работ по коррозии бетона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Толпин Д.А. Сравнительная стойкость бетонов с заполнителем различных размеров и без него // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 43–47. DOI 10.12737/article_5a001aaf2319e6.57195740.
2. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М. Методы оценки коррозионной стойкости цементных композитов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 23–24.
3. Зубков В.А. Совершенствование ультразвукового метода определения прочности бетона // Бетон и железобетон. 1997. № 4. С. 21–23.
4. Popovics, S. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship. *Materials Evaluation*. 2001; 59(2): 123–130.
5. Смирнов В.В., Назаров М.А. Ультразвуковой контроль подвижности бетонной смеси // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-12. С. 2630–2633.
6. Варламов А.А., Новиков М.А., Курбангалеева М.Р. Исследования бетона неразрушающими методами // Современное промышленное и гражданское строительство. 2021. Т. 17, № 3. С. 147–156.
7. Lin Y, Lai, C.P. and Yen, T. Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in concrete. *ACI Materials Journal*. 2003; 100(1): 21–28.
8. Trtnik, G., Kavcic, F. and Turk, G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*. 2009; 49(1): 53–60.
9. Сериков Я.А. Информационно-измерительная система для исследования структуры монолитного бетона ультразвуковым методом // Территория науки. 2017. № 3. С. 96–100.
10. Штенгель В.Г. Ультразвуковой контроль структуры бетона // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 1. С. 4.
11. Antonaci, P. et al. Nonlinear ultrasonic evaluation of load effects on discontinuities in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2010; 40(2): 340–346.
12. Знайченко П.А. Определение глубины трещин ультразвуковым методом в обделке транспортных тоннелей большого сечения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 1. С. 34–37.
13. Ismail M.P. Selection of suitable NDT methods for building inspection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 271:012085.
14. Флегонтов Д.В., Акулова М.В., Петров А.В. Термический анализ как способ установления скрытых повреждений // Пожарная и аварийная безопасность. 2019. № 2(13). С. 11–15.
15. Семененко С.Я., Марченко С.С., Арьков Д.П. Тарировочная зависимость при ультразвуковом контроле коэффициента фильтрации бетона // Аграрный научный журнал. 2018. № 10. С. 62–66. DOI 10.28983/asj.v0i10.456.
16. Browne, Terence M. et al. Underwater Bridge Inspection, FHWA-NHI-10-027, Office of Bridge Technology, FHWA, 2010
17. Пшеничный Г.Н. О пилообразности твердения цементных бетонов // Техника и технология силикатов. 2015. Т. 22, № 2. С. 9–14.

REFERENCES

1. Rahimbaev Sh.M., Tolypina N.M., Tolypin D.A. Comparative durability of concretes with and without filler of various sizes. *Bulletin of belgorod state technological university named after. V.G. Shukhov*. 2017; 11: 43–47. DOI 10.12737/article_5a001aaf2319e6.57195740. (in Russ.)
2. Rahimbaev Sh.M., Tolypina N.M. Methods for assessing the corrosion resistance of cement composites. *Bulletin of belgorod state technological university named after. V.G. Shukhov*. 2012; 3: 23–24. (in Russ.)
3. Zubkov V.A. Improvement of the ultrasonic method for determining the strength of concrete. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1997; 4: 21–23. (in Russ.)
4. Popovics S. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship. *Materials Evaluation*. 2001; 59(2): 123–130.
5. Smirnov V.V., Nazarov M.A. Ultrasonic examination of concrete consistency. *Fundamental research*. 2013; 10–12: 2630–2633. (in Russ.)
6. Varlamov A.A., Novikov M.A., Kurbangaleeva M.R. Research of concrete by non-destructive methods. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2021; 17(3): 147–156. (in Russ.)
7. Lin Y, Lai, C.P. and Yen, T. Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in concrete. *ACI Materials Journal*. 2003;100(1):21–28. (in Russ.)
8. Trtnik G., Kavcic F., Turk G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*. 2009; 49(1): 53–60.
9. Serikov Ya. A. Information and measurement system for studying the structure of monolithic concrete by ultrasonic method. *Territoriya nauki*. 2017; 3: 96–100. (in Russ.)
10. Shtengel' V. G. Ultrasonic inspection of the concrete structure. *Ndt world*. 2004;1:4. (in Russ.)
11. Antonaci P. et al. Nonlinear ultrasonic evaluation of load effects on discontinuities in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2010; 40(2): 340–346.
12. Znaychenko P.A. The determination of crack depth by ultrasonic method in the lining of transport tunnels of large cross section. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2006; 1: 34–37. (in Russ.)
13. Ismail M.P. Selection of suitable NDT methods for building inspection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 271:012085.
14. Flegontov D.V., Akulova M.V., Petrov A.V. Thermal analysis as a method of establishing hidden damages. *Pozharnaya i avarijnaya bezopasnost'*. 2019; 2(13): 11–15. (in Russ.)
15. Semenenko S.Ya., Marchenko S.S., Arkov D.P. The calibration relationship by ultrasound filtration coefficient of concrete. *The Agrarian Scientific Journal*. 2018; 10: 62–66. DOI 10.28983/asj.v0i10.456. (in Russ.)
16. Browne, Terence M. Underwater Bridge Inspection, FHWA-NHI-10-027. *Office of Bridge Technology*, FHWA, 2010
17. Pshenichnyy G.N. On the sawtooth hardening of cement concrete. *Technique and technology of silicates*. 2015; 22(2): 9–14. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Толыпина Н.М. Постановка задач исследования. Выбор методологии и методов. Обобщение результатов работы, формулирование выводов. Редактирование статьи.

Данилов Д.Ю. Выполнение экспериментальных исследований, обработка результатов. Оформление статьи.

CONTRIBUTION OF AUTHORS

Tolypina N.M. Setting research objectives. The choice of methodology and methods. Summarizing the results of the work, formulating conclusions. Editing the article.

Danilov D.Yu. Performing experimental studies, processing the results. The design of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Толыпина Наталья Максимовна – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Строительное материаловедение изделий и конструкций» Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5788-8520>, **SPIN-код:** 4650-2537, **Scopus Author ID:** 56568225500, **Researcher ID:** I-8523-2018, e-mail: tolypina.n@yandex.ru

Данилов Дмитрий Юрьевич – аспирант кафедры «Строительное материаловедение изделий и конструкций» Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2891-961X>, **SPIN-код:** 6472-1850, **Researcher ID:** HGB-3766-2022, e-mail: dimadan31@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia M. Tolypina. Dr. of Sci., Associate Professor, Construction Materials Science, Products and Structures Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46, Kostiukova Street, Belgorod, 308012), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5788-8520>, **SPIN-код:** 4650-2537, **Scopus Author ID:** 56568225500, **Researcher ID:** I-8523-2018, e-mail: tolypina.n@yandex.ru

Dmitrii Yu. Danilov. Graduate student, Construction Materials Science, Products and Structures Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46, Kostiukova Street, Belgorod, 308012), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2891-961X>, **SPIN-код:** 6472-1850, **Researcher ID:** HGB-3766-2022, e-mail: dimadan31@gmail.com