

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-106-113

¹Строкин К.Б., ¹Новиков Д.Г., ^{2,*}Коновалова В.С., ²Касьяненко Н.С.¹Сахалинский государственный университет²Ивановский государственный политехнический университет

*E-mail: kotprotiv@yandex.ru

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА ПРИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ

Аннотация. В статье рассмотрено изменение структурно-фазового состава цементного камня из портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н в процессе бактериальной и грибковой коррозии в течение 6 месяцев при увлажнении. На рентгенограммах цементного камня зафиксированы пики, характеризующие негидратированные компоненты портландцемента алит, белит, трехкальциевый алюминат, четырехкальциевый алюмоферрит и гипс. Методом рентгенофазового анализа установлено, что при микробиологической коррозии происходит снижение содержания всех фаз цементного камня. Грибки *Aspergillus niger* van Tieghem сильнее влияют на структурно-фазовый состав цементного камня. Грибковые микроорганизмы разрушают кристаллические фазы и поглощают рентгеноаморфные фазы – гидросиликаты кальция C-S-H (I) и C-S-H (II), тоберморит. При воздействии на цементный камень бактерий *Bacillus subtilis* происходит увеличение содержания фазы кальцита, который является продуктом коррозии, в то время как действие черной плесени *Aspergillus niger* van Tieghem уменьшает интенсивность пиков CaCO₃. Снижение содержания низкоосновных гидросиликатов кальция и этtringита, а также других кристаллических фаз, привело к уменьшению прочности на сжатие цементного камня. За 6 месяцев микробиологической коррозии цементного бетона в условиях постоянного смачивания прочность на сжатие снижается примерно на 35 %.

Ключевые слова: микробиологическая коррозия, коррозия бетона, бактериальная коррозия, грибковая коррозия, рентгенографический анализ, прочность бетона.

Введение. Цемент и бетон могут подвергаться биологическому разложению различными микроорганизмами. Уменьшение гидроксида кальция в порах цементного камня нарушает баланс между продуктами отверждения и растворенным гидроксидом кальция, что приводит к растворению и гидролизу продуктов отверждения и выщелачиванию новых порций Ca(OH)₂ [1, 2]. При этом происходит разрушение цементного камня за счет выщелачивания из него гидроксида кальция [3–5]. Компоненты цемента, такие как карбонат кальция, силикаты и алюминаты, медленно вступают в реакцию с водой и продуктами бактериального метаболизма [6, 7].

Микробное воздействие на цементные и бетонные конструкции увеличивает пористость, облегчая проникновение воды и развитие коррозионных процессов [8, 9]. Известно, что осаждение и растворение кальцита (CaCO₃) вызывается местными микроорганизмами [10–12]. Полезным аспектом взаимодействия микробов с цементирующими материалами является образование чешуек оксида (гидроксида) кальция, которые, действуя в качестве пассивного слоя, могут избирательно закупоривать поры [13, 14].

Реакция биогенной кислоты и других продуктов жизнедеятельности микроорганизмов с цементирующими материалами в бетоне приво-

дит к разрушению конструкции. Скорость разрушения бетона и цементного камня в значительной степени зависит от растворимости продуктов реакции выделяемых микроорганизмами органических кислот и составных частей бетона. Чем больше продуктов реакции растворяется и уносится агрессивным раствором, тем быстрее разрушаются бетон и цементный камень. Микроорганизмы растворяют цементную матрицу с выщелачиванием структурных элементов и накоплением их в биопленке и связанной с ней микросреде. Прокорродировавшие внутренние слои состоят из гипса и влаги [13, 15]. Этtringит, образующийся в результате бактериального воздействия во внутренних областях цементного камня, может вызывать внутренние напряжения, приводящие к растрескиванию и образованию локальных ям и трещин, что еще больше облегчает проникновение агрессивных веществ в бетон [16, 17]. Скорость микробиологической коррозии цементного бетона может достигать 4–5 мм/год [13, 18].

Структурно-фазовый состав цементного камня напрямую связан с физико-механическими характеристиками бетона. При жидкостной коррозии цементного бетона в агрессивных средах снижается содержание фазы гидросиликата кальция, которая является носителем механической прочности [19, 20].

Рентгенофазовый анализ цементного камня дает представление о протекающих в бетоне изменениях на любом сроке коррозии и помогает прогнозировать долговечность и определять срок службы бетонного изделия. В связи с этим была поставлена цель исследовать влияние микроорганизмов на структурно-фазовый состав цементного бетона. Для этого проведен рентгенофазовый анализ цементного камня при бактериальной и грибковой коррозии.

Материалы и методы. Исследования проводились на образцах, изготовленных из портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н с водоцементным соотношением В/Ц = 0,3 и отвержденных в течение 28 суток на воздухе. Химический состав портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н, установленный сертификатом качества, указан в таблице 1, минералогический состав представлен в таблице 2.

Таблица 1

Химический состав портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	CaO _{св}	Другие примеси
21,55	5,55	4,7	62,93	0,76	2,37	0,54	0,45	1,15

Таблица 2

Содержание основных минералов в портландцементе марки ЦЕМ I 42,5Н, %

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	ТЭА
68,1	11,0	8,7	11,9	0,3

Для заражения бетона использовались следующие штаммы микроорганизмов: бактерии *Bacillus subtilis*, имеющие название «сенная палочка», микромицеты *Aspergillus niger* van Tieghem, называемые «черная плесень». Поверхность цементного камня равномерно опрыскивалась водной суспензией спор микроорганизмов, затем образцы подсушивались в боксе при температуре 25 °С и относительной влажности воздуха 70-90 % до высыхания капель. Чашки Петри с зараженными микроорганизмами образцами помещались в эксикатор, на дно которого была налита дистиллированная вода, и выдерживались при температуре 29±2 °С и относительной влажности воздуха более 90 % в течение 28 суток. Каждые 7 суток крышки эксикаторов приоткрывались на 3 минуты для доступа воздуха.

После заражения микроорганизмами цементные образцы подвергались воздействию капиллярной влаги в течение 6 месяцев. Для этого образцы помещались в емкость на синтепоновую подкладку, часть которой для поддержания влажности на постоянном уровне была опущена в сосуд с водой.

Рентгенографический анализ фазового состава цементного камня проводился после высушивания и измельчения образца до порошкообразного состояния. Рентгенограммы снимались на порошковом рентгеновском дифрактометре D8 Advance при длине волны рентгеновского излучения $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$. Сущность качественного рентгенографического анализа сводится к сопоставлению экспериментально определенных значений межплоскостных расстояний, линий и их интенсивности с эталонными рентгенограммами. Идентификация фаз после получения рентгенограммы начинается с нахождения углов дифракции 2θ и соответствующих им межплоскостных

расстояний, а также относительной интенсивности каждой линии. По найденному для каждого пика значению угла θ при известной длине волны λ применяемого рентгеновского излучения определяются величины межплоскостного расстояния d по уравнению Вульфа – Брегга:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}. \quad (1)$$

Высота самого интенсивного рефлекса принимается за 100 %, высоты всех остальных пиков (в %) рассчитываются методом пропорции.

Прочность на сжатие (R_c) определяется при испытании образцов статической нагрузкой по методике, установленной ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Нагружение образцов проводится непрерывно с постоянной скоростью нарастания нагрузки до их разрушения. При этом время нагружения исследуемого образца до его разрушения было не менее 30 с. Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принимается за разрушающую нагрузку. Прочность бетона на сжатие для каждого образца вычисляется по формуле:

$$R_c = \alpha \frac{F}{A}, \quad (2)$$

где: α – масштабный коэффициент для приведения прочности бетона к прочности бетона в образцах базовых размера и формы, принимаемый равным 0,95 по ГОСТ 10180-2012; F – разрушающая нагрузка, Н; A – площадь рабочего сечения бетонного образца, мм².

Основная часть. На рентгенограммах цементного камня (рис. 1) видно, что при микробиологической коррозии происходит уменьшение интенсивности пиков. Это свидетельствует

об уменьшении содержания фазовых составляющих цементного камня вследствие разложения их компонентов микроорганизмами. Узкие пики

высокой интенсивности соответствуют кристаллической структуре исследуемых образцов цементного камня.

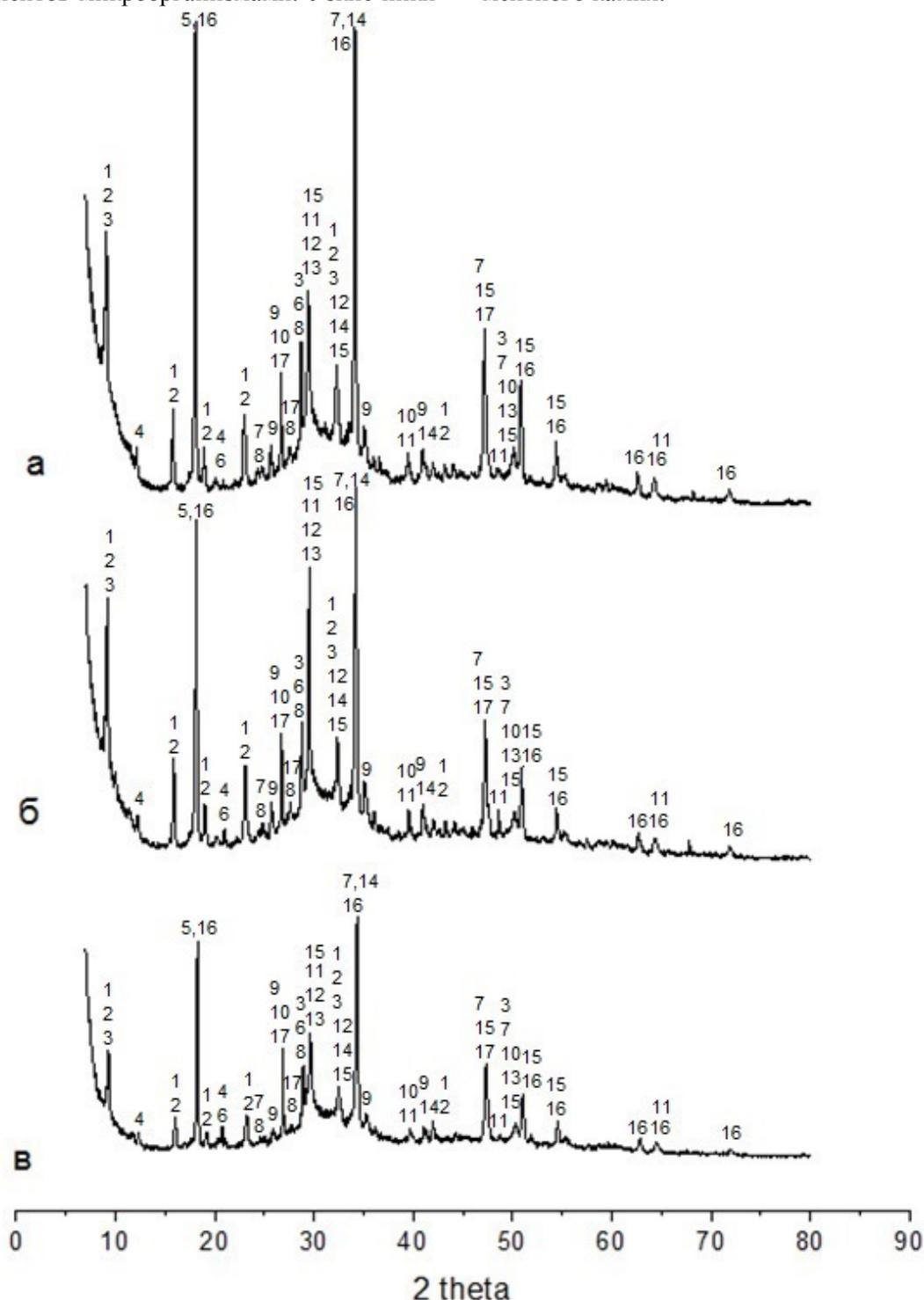


Рис. 1. Рентгенограммы образцов цементного камня после 6 месяцев микробиологической коррозии: а – не зараженный микроорганизмами; б – зараженный бактериями *Bacillus subtilis*; в – зараженный грибами *Aspergillus niger* van Tieghem; 1 – таумасит; 2 – этtringит; 3 – С-S-H (II); 4 – жисмондин; 5 – гиббсит; 6 – гипс; 7 – браунмиллерит; 8 – ксонотлит; 9 – силлиманит; 10 – β -кварц; 11 – кальцит; 12 – алит; 13 – тоберморит; 14 – белит; 15 – С-S-H (I); 16 – портландит; 17 – кианит

Однако в структуре цементного камня присутствует и рентгеноаморфная фаза. На рентгенограммах зафиксированы два крупных диффузионных гало в интервалах 2θ до 10° и $29-36^\circ$, ко-

торые характеризуют наличие рентгеноаморфных веществ, вероятно гидросиликатов кальция и тоберморитового геля. Под действием грибковых микроорганизмов площади диффузионных гало уменьшаются, значит, рентгеноаморфных фаз в

цементном камне становится меньше, что, вероятно, вызвано поглощением их грибами. Среднее снижение интенсивности линий, характеризующих совместное присутствие тоберморита и тоберморитоподобного гидросиликата кальция C-S-H (I), составило 7 % в случае бактериальной коррозии и 34 % – в случае грибковой.

В результате микробиологической коррозии на рентгенограмме происходит небольшой сдвиг рефлексов по значениям углов 2θ , что связано с изменением аморфно-кристаллической структуры цементного камня. Однако, для одних и тех же фаз пики остаются выраженными.

При бактериальной коррозии цементного камня на рентгенограмме происходит значительное усиление пика при $2\theta = 29,53^\circ$ (рис. 1-б), который соответствует увеличению содержания фазы кальцита CaCO_3 , образующегося при воздействии на цементный камень выделяемой бактериями углекислоты [21]. Интенсивность других пиков, идентифицирующих кальцит, также увеличена в этом случае коррозии. В среднем усиление пиков кальцита на рентгенограмме цементного камня после воздействия бактерий *Vacillus subtilis* составило около 30 %. При грибковой коррозии цементного камня интенсивность пиков кальцита на рентгенограмме снизилась на 12 %, что говорит о разрушении этой фазы микромицетами *Aspergillus niger* van Tieghem.

Снижение интенсивности пиков портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на рентгенограммах обусловлено выщелачиванием под воздействием на цементный камень влаги и микроорганизмов [21, 22]. Вымывание портландита из цементного камня в результате коррозионных процессов приводит к дестабилизации высокоосновных гидратных фаз цементного камня и их разрушению, что отражено уменьшением интенсивности линий на рентгенограммах.

На рентгенограммах цементных образцов обнаружены негидратированные фазы цементного клинкера – алит C_3S и белит C_2S . Установлено совместное присутствие в цементном камне алита с продуктами его гидратации – низкоосновными C-S-H (I) и высокоосновными C-S-H (II) гидросиликатами кальция. Негидратированный браунмиллерит C_4AF представлен совместно с гидросиликатами кальция.

Этtringит и таумасит в цементном камне зачастую находятся в кристаллической смеси и на рентгенограммах представлены совместными пиками.

На рентгенограммах имеются два пика невысокой интенсивности при угле 2θ равном $20,758^\circ$ и $28,963^\circ$, относящиеся к двухводному гипсу

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, что говорит о малом количестве этой фазы в цементном камне. В области $2\theta = 20,758^\circ$ также расположен пик, характеризующий присутствие жисмондина, а в области $2\theta = 28,963^\circ$ – пик, соответствующий гидросиликату кальция C-S-H (II).

Зафиксированы пики, относящиеся к гиббситу $\text{Al}(\text{OH})_3$ и гидросиликатам алюминия – силлиманиту и кианиту.

Установлено присутствие в структурно-фазовом составе цементного камня небольшого количества β -кварца совместно с гидросиликатами кальция или алюминия.

Пики малой интенсивности (3–5 %) на рентгенограммах образцов соответствуют продуктам гидратации минерала портландцемента трехкальциевого алюмината C_3A – восьми, тринадцати и девятнадцативодным гидроалюминатам кальция, а также высокосульфатной форме гидросульфогеррита кальция.

Между характеристиками структуры и параметрами прочности цементного камня существует взаимосвязь. Поскольку увеличения рентгеноаморфной фазы в цементном камне на рентгенограммах не зафиксировано, а уменьшение количества портландита не связано с образованием новых фаз, изменение прочностных характеристик обуславливается снижением содержания кристаллических составляющих. Низкоосновные гидросиликаты кальция C-S-H (I) и этtringит, образующийся на ранних стадиях твердения цементного камня, обеспечивают механическую прочность бетона. Снижение содержания этих фаз в цементном камне в результате воздействия микроорганизмов соответствует уменьшению прочности на сжатие цементных образцов (рис. 2). За 6 месяцев при бактериальной коррозии потеря прочности образцов составила 32 %, при воздействии грибов – 37 %.

Большие потери прочности цементным камнем при грибковой коррозии связаны с интенсивным поглощением микромицетами гидросиликата кальция C-S-H (I). При бактериальной коррозии происходит нейтрализация выделяемой бактериями углекислотой гидроксида кальция сначала из поровой жидкости, а затем из структуры цементного камня. В результате этого образуется CaCO_3 , который имеет низкую растворимость и оседает в порах, закрывая их, однако это не приводит к улучшению прочностных характеристик цементного камня, поскольку вода с вырабатываемой бактериями углекислотой вновь и вновь поступает в цементный камень и растворяет в нем гидроксид кальция. Вследствие этого происходит изменение структуры цементного камня и потеря им прочности.

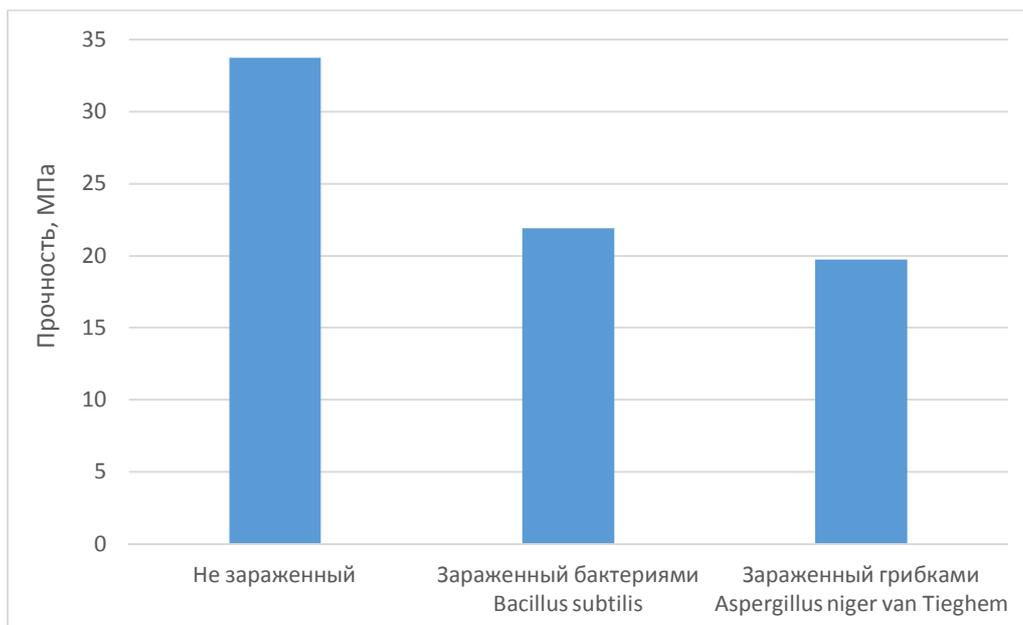


Рис. 2. Изменение предела прочности на сжатие образцов из цементного камня в результате микробиологической коррозии

Выводы.

1. Рентгенограммы исследуемых образцов цементного камня содержат большое количество ярко выраженных узких пиков и свидетельствуют о высоко кристаллической структуре фаз с присутствием в цементном камне рентгеноаморфной фазы гидросиликатов кальция и тоберморитового геля.

2. При грибковой коррозии происходит интенсивное уменьшение количества как кристаллических, так и рентгеноаморфных фаз в цементном камне.

3. При бактериальной коррозии увеличивается количество кальцита CaCO_3 вследствие воздействия на цементный камень углекислоты, которая образуется в процессе жизнедеятельности бактерий.

4. Микроорганизмы изменяют структурно-фазовый состав цементного бетона и способствуют ухудшению его прочностных характеристик. Снижение содержания гидросиликатов кальция и этрингита, а также других кристаллических фаз в цементном камне, приводит к уменьшению прочности на сжатие примерно на 35 % за 6 месяцев микробиологической коррозии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агзамов Ф.А., Махмутов А.Н., Токунова Э.Ф. Исследование коррозионной стойкости тампонажного камня в магниальных агрессивных средах // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 3. С. 73–78. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.73-78>

2. Москвин В.М. Коррозия бетона. М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1952. 344 с.

3. Bentz D.P., Garboczi E.J. Modelling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effects on pore space percolation and diffusivity // Materials and Structures. 1992. Vol. 25. Pp. 523–533. <https://doi.org/10.1007/BF02472448>

4. Duong V., Sahamitmongkol R., Tangtermsirikul S. Effect of leaching on carbonation resistance and steel corrosion of cement-based materials // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 40. Pp. 1066–1075. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.042>

5. Oroza A.H., Bouza D.G. Deterioration of Structures Affected by Concrete Leaching // Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete. RILEM Bookseries, vol 22. Springer, Cham, 2020. Pp. 319–327. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1_36

6. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2011. 524 с.

7. Strokova V.V., Zhernovsky I.V., Nelyubova V.V., Rykunova M.D. Structural Transformations of Cement Stone in Conditions of Development of the Biocenosis of a Poultry Enterprise // Materials Science Forum. 2019. 945. Pp. 269–275. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.269>

8. Чеснокова Т.В., Логинова С.А., Киселев В.А. Анализ воздействия биологической коррозии различной длительности на бетон // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. № 2 (54). С. 98–101.

9. Munyai O.M., Thiong'o J.K., Muthengia J.W., Mutitu D.K., Mwirichia R., Muriithi G., Marangu J.M. Study on the effect of Thiobacillus inter-

medius bacteria on the physico-mechanical properties of mortars of ordinary portland cement // *Heliyon*. 2020. Vol. 6. Issue 1. E03232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03232>

10. Ричардсон А., Ковентри К., Пэсли Дж. Микробиологическое осаждение кальцита: применение для залечивания трещин // *Цемент и его применение*. 2016. № 4. С. 118–122.

11. Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Фомичев В.Т. Химические аспекты процесса устранения трещин бетона с помощью бактерий // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2018. Т. 5. № 3. 12 с. <http://dx.doi.org/10.15862/13SATS318>

12. Nguyen N.T.H., Nguyen N.Q., Son Nguyen K.S. Developing the solution of microbially induced CaCO₃ precipitation coating for cement concrete // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 431. Issue 6. Pp. 062006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/431/6/062006>

13. Natarajan K.A. Biofouling and Microbially influenced corrosion // *Biotechnology of Metals. Principles, Recovery Methods, and Environmental Concerns*. Elsevier, 2018. Pp. 355–393. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804022-5.00012-8>

14. Rong H., Qian C. Characterization of microbe cementitious materials // *Chinese Science Bulletin*. 2012. Vol. 57. Pp. 1333–1338. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5047-9>

15. Tazaki K., Mori T., Nonaka T. Microbial jarosite and gypsum from corrosion of Portland cement concrete // *Canadian Mineralogist*. 1992. Vol. 30. Pp. 431–444.

16. Василенко М.И., Гончарова Е.Н. Микробиологические особенности процесса повреждения бетонных поверхностей // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 4–4. С. 886–891.

17. Рахимбаев Ш.М., Тольпина Н.М. Обоснование выбора типа вяжущего для агрессивных сред органического происхождения на основе теории гетерогенных физико-химических процессов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. Т. 1. № 9. С. 159–163.

18. Wei S., Jiang Z., Liu H., Zhou D., Sanchez-Silva M. Microbially induced deterioration of concrete – a review // *Brazilian Journal of Microbiology*. 2013. Vol. 44. No. 4. Pp. 1001–1007. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822014005000006>

19. Бутт Ю.М. Технология вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1965. 620 с.

20. Rumyantseva V.E., Konovalova V.S., Narmaniya B.E. Changes in the structural and phase composition and strength characteristics of concrete during liquid corrosion in chloride-containing media // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1926. P. 012057. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012057>

21. Строкин К.Б., Новиков Д.Г., Коновалова В.С., Логинова С.А., Нармания Б.Е. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из железобетона в условиях микробиологической коррозии // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2020. № 4. С. 62–69.

22. Strokin K., Novikov D., Konovalova V. Forecasting the durability of reinforced concrete under conditions of microbiological corrosion // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 274. 04003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127404003>.

Информация об авторах

Строкин Константин Борисович, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры строительства, директор Технического нефтегазового института. E-mail: strokin07@rambler.ru. Сахалинский государственный университет. Россия, 693000, Южно-Сахалинск, проспект Коммунистический, д. 33.

Новиков Денис Геннадьевич, сотрудник научно-исследовательской лаборатории. E-mail: denis.g.novikov@gmail.com. Сахалинский государственный университет. Россия, 693000, Южно-Сахалинск, проспект Коммунистический, д. 33.

Коновалова Виктория Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры естественных наук и техносферной безопасности. E-mail: kotprotiv@yandex.ru. Ивановский государственный политехнический университет. Россия, 153000, Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21.

Касьяненко Наталья Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры естественных наук и техносферной безопасности. E-mail: kasiyanenko@gmail.com. Ивановский государственный политехнический университет. Россия, 153000, Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21.

Поступила 22.07.2021 г.

© Строкин К.Б., Новиков Д.Г., Коновалова В.С., Касьяненко Н.С., 2021

¹*Strokin K.B.*, ¹*Novikov D.G.*, ^{2,*}*Konovalova V.S.*, ²*Kasiyanenko N.S.*¹*Sakhalin State University*²*Ivanovo State Polytechnic University**E-mail: kotprotiv@yandex.ru

CHANGES IN THE STRUCTURAL AND PHASE COMPOSITION OF CEMENT CONCRETE DURING MICROBIOLOGICAL CORROSION

Abstract. *The article considers the change in the structural and phase composition of cement stone made of Portland cement of the CEM I 42.5 N brand in the process of bacterial and fungal corrosion during 6 months when humidified. The X-ray images of cement stone show peaks that characterize the non-hydrated components of Portland cement alite, belite, tricalcium aluminate, four-calcium aluminoferrite and gypsum. By the method of X-ray phase analysis, it is found that during microbiological corrosion, the content of all phases of cement stone decreases. The aspergillus niger van Tieghem fungi have a stronger effect on the structural and phase composition of cement stone. Fungal microorganisms destroy the crystalline phases and absorb amorphous phases – calcium hydrosilicates C-S-H (I) and C-S-H (II) and tobermorite. When bacteria Bacillus subtilis affects the cement stone, the content of the calcite phase increases, which is a product of corrosion, while the action of black mold reduces the intensity of CaCO₃ peaks. A decrease in the content of low-base calcium hydrosilicates and ettringite, as well as other crystalline phases, leads to a decrease in the compressive strength of the cement stone. During 6 months of microbiological corrosion of cement concrete under conditions of constant wetting, the compressive strength decreases by about 35 %.*

Keywords: *microbiological corrosion, concrete corrosion, bacterial corrosion, fungal corrosion, X-ray analysis, concrete strength.*

REFERENCES

1. Agzamov F.A., Makhmutov A.N., Tokunova E.F. Study of corrosion stability of a cement stone in magnesia aggressive environment [Issledovanie korrozionnoj stojkosti tamponazhnogo kamnya v magnezial'nyh agressivnyh sredah]. Georesources. 2019. Vol. 21. No. 3. Pp. 73–78. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.73-78> (rus)
2. Moskvina V.M. Corrosion of concrete [Korroziya betona]. Moscow: State Publishing house of literature on construction and architecture, 1952. 344 p. (rus)
3. Bentz D.P., Garboczi E.J. Modelling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effects on pore space percolation and diffusivity. Materials and Structures. 1992. Vol. 25. Pp. 523–533. <https://doi.org/10.1007/BF02472448>
4. Duong V., Sahamitmongkol R., Tangtermsirikul S. Effect of leaching on carbonation resistance and steel corrosion of cement-based materials. Construction and Building Materials. 2013. Vol. 40. Pp. 1066–1075. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.042>
5. Oroza A.H., Bouza D.G. Deterioration of Structures Affected by Concrete Leaching. Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete. RILEM Bookseries, vol 22. Springer, Cham, 2020. Pp. 319–327. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22034-1_36
6. Bazhenov Yu.M. Technology of concrete [Tekhnologiya betona]. Moscow: Publishing house «ASV», 2011. 524 p. (rus)
7. Strokova V.V., Zhernovsky I.V., Nelyubova V.V., Rykunova M.D. Structural Transformations of Cement Stone in Conditions of Development of the Biocenosis of a Poultry Enterprise. Materials Science Forum. 2019. 945. Pp. 269–275. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.269>
8. Chesnokova T.V., Loginova S.A., Kiselev V.A. Analysis of the impact of biological corrosion of different duration on concrete [Analiz vozdeystviya biologicheskoy korrozii razlichnoj dlitel'nosti na beton]. Modern High Technologies. Regional Application. 2018. No. 2 (54). Pp. 98–101. (rus)
9. Munyao O.M., Thiong'o J.K., Muthengia J.W., Mutitu D.K., Mwirichia R., Muriithi G., Marangu J.M. Study on the effect of Thiobacillus intermedius bacteria on the physico-mechanical properties of mortars of ordinary portland cement. Heliyon. 2020. Vol. 6. Issue 1. E03232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03232>
10. Richardson A., Coventry K., Pasley J. Micro-induced calcite precipitation – crack sealing application [Mikrobiologicheskoe osazhdenie kal'tita: primeneniye dlya zalechivaniya treshchin]. Cement and its Applications. 2016. No. 4. Pp. 118–122. (rus)
11. Erofeev V.T., Al-Dulaimi Salman Dawood Salman, Fomichev V.T. Chemical aspects of the process of concrete cracks elimination with the help of bacteria [Himicheskie aspekty processa ustraneniya treshchin betona s pomoshch'yu bakterij]. Russian journal of transport engineering. 2018. Vol. 5. No. 3. 12 p. <http://dx.doi.org/10.15862/13SATS318> (rus)
12. Nguyen N.T.H., Nguyen N.Q., Son Nguyen K.S. Developing the solution of microbially induced

CaCO₃ precipitation coating for cement concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 431. Issue 6. Pp. 062006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/431/6/062006>

13. Natarajan K.A. Biofouling and Microbially influenced corrosion. Biotechnology of Metals. Principles, Recovery Methods, and Environmental Concerns. Elsevier, 2018. Pp. 355–393. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804022-5.00012-8>

14. Rong H., Qian C. Characterization of microbe cementitious materials. Chinese Science Bulletin. 2012. Vol. 57. Pp. 1333–1338. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5047-9>

15. Tazaki K., Mori T., Nonaka T. Microbial jarosite and gypsum from corrosion of Portland cement concrete. Canadian Mineralogist. 1992. Vol. 30. Pp. 431–444.

16. Vasilenko M.I., Goncharova E.N. Microbiological characteristics of damage to concrete surfaces [Mikrobiologicheskie osobennosti processa povrezhdeniya betonnykh poverhnostej]. Fundamental research. 2013. No. 4–4. Pp. 886–891. (rus)

17. Rahimbaev S., Tolykina N. Reasons for the choice of type of the organic origin knitting for hostile environment on the basis of the theory of heterogeneous physical and chemical processes [Obosnovanie vybora tipa vyazhushchego dlya agressivnykh sred organicheskogo proiskhozhdeniya na osnove teorii geterogennykh fiziko-himicheskikh processov]. Bulletin of Belgorod State Technological University

named after. V.G. Shukhov. 2016. No. 9. Pp. 159–163. (rus)

18. Wei S., Jiang Z., Liu H., Zhou D., Sanchez-Silva M. Microbially induced deterioration of concrete – a review. Brazilian Journal of Microbiology. 2013. Vol. 44. No. 4. Pp. 1001–1007. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822014005000006>

19. Butt Yu. M. Technology of binders [Tekhnologiya vyazhushchih veshchestv]. Moscow: Higher school, 1965. 620 p. (rus)

20. Rumyantseva V.E., Konovalova V.S., Narmaniya B.E. Changes in the structural and phase composition and strength characteristics of concrete during liquid corrosion in chloride-containing media. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1926. P. 012057. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012057>

21. Strokin K.B., Novikov D.G., Konovalova V.S., Loginova S.A., Narmaniya B.E. Determination of safe service life of structures made of reinforced concrete at microbially induced corrosion [Opredelenie resursa bezopasnoy ekspluatatsii konstruksiy iz zhelezobetona v usloviyakh mikrobiologicheskoy korrozii]. Modern problems of civil protection. 2020. No. 4 (37). Pp. 62–69. (rus)

22. Strokin K., Novikov D., Konovalova V. Forecasting the durability of reinforced concrete under conditions of microbiological corrosion. E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. 04003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127404003>

Information about the authors

Strokin, Konstantin B. DSc, Assistant professor. E-mail: strokin07@rambler.ru. Sakhalin State University. Russia, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Kommunistichesky ave., 33.

Novikov, Denis G. Research laboratory employee. E-mail: denis.g.novikov@gmail.com. Sakhalin State University. Russia, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Kommunistichesky ave., 33.

Konovalova, Viktoriya S. PhD, Assistant professor. E-mail: kotprotiv@yandex.ru. Ivanovo State Polytechnic University. Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetevskiy ave., 21.

Kasiyanenko, Nataliya S. PhD, assistant professor of the department of natural sciences and technosphere safety. E-mail: kasiyanenko@gmail.com. Ivanovo State Polytechnic University. Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetevskiy ave., 21.

Received 22.07.2021

Для цитирования:

Строкин К.Б., Новиков Д.Г., Коновалова В.С., Касьяненко Н.С. Изменение структурно-фазового состава цементного бетона при микробиологической коррозии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 11. С. 106–113. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-106-113

For citation:

Strokin K.B., Novikov D.G., Konovalova V.S., Kasiyanenko N.S. Changes in the structural and phase composition of cement concrete during microbiological corrosion. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 11. Pp. 106–113. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-106-113