

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-320-328>

УДК 666.972.524

Влияние карбонизации бетонных поверхностей на их сцепление со свежеложенным бетоном

Докт. техн. наук, проф. В. В. Молодин¹, А. Е. Ануфриева¹,
докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович²

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (СИБСТРИН)
(Новосибирск, Российская Федерация),

²Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В процессе эксплуатации бетонные и железобетонные конструкции подвержены воздействию агрессивной среды углекислого газа. При реконструкции и капитальном ремонте причальных сооружений прибрежной зоны морей Дальнего Востока установлена слабая прочность сцепления «старого» карбонизированного и «нового» ремонтного бетонов. Причиной, препятствующей надежному сцеплению бетонов, является образование непрочных продуктов коррозии в порах и на поверхности «старого» бетона. В процессе исследования выполнены ускоренные испытания карбонизации бетона от воздействия углекислого газа. Структура карбонизированного цементного камня исследована с помощью электронного сканирующего микроскопа. Результаты исследований позволили оценить структуры «здорового» и пораженного карбонизацией цементных камней. Выполненный анализ процесса карбонизации бетона, включая микрофотографии образцов, показал, что под действием уголекислоты поверхностный слой толщиной 4 мм и более претерпевает перестройку структуры. Волокнистые образования разрушаются, и карбонизированный объем представляет собой груду слабосвязанных рыхлых новообразований и пленок, перекрывающих входы в капиллярную систему бетона. Они не являются надежной основой для сцепления «нового» и «старого» бетонов и препятствуют проникновению жидкости, содержащей продукты растворения цемента из «нового» бетона в капилляры здоровой структуры «старого» для их надежного соединения.

Ключевые слова: углекислый газ, адгезия, прочность, коррозия, железобетон, гидротехнические сооружения, деструкция, структура цементного камня

Для цитирования: Молодин, В. В. Влияние карбонизации бетонных поверхностей на их сцепление со свежеложенным бетоном / В. В. Молодин, А. Е. Ануфриева, С. Н. Леонович // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 320–328. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-320-328>

Influence of Carbonization of Concrete Surfaces on their Adhesion with Freshly-Laid Concrete

V. V. Molodin¹, A. E. Anufrieva¹, S. N. Leonovich²

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN)
(Novosibirsk, Russian Federation),

²Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. During operation, concrete and reinforced concrete structures are exposed to the aggressive environment of carbon dioxide. During the reconstruction and overhaul of the berthing facilities in the coastal zone of the seas of the Far East, a weak bond strength of the “old” carbonated and “new” repair concrete has been established in the paper. The reason that prevents

Адрес для переписки

Молодин Владимир Викторович
Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
ул. Ленинградская, 113,
630008, г. Новосибирск, Российская Федерация
Тел.: +7 913 916-03-00
molodin@sibstrin.ru

Address for correspondence

Molodin Vladimir V.
Novosibirsk State University
of Architecture and Civil Engineering
113, Leningradskaya str.,
630008, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 913 916-03-00
molodin@sibstrin.ru

reliable adhesion of concrete is the formation of fragile corrosion products in the pores and on the surface of “old” concrete. Accelerated tests of concrete carbonization from exposure to carbon dioxide have been carried out in the course of the study. The structure of the carbonized cement stone has been examined using a scanning electron microscope. The research results have made it possible to assess the structure of a “healthy” cement stone and affected by carbonization. The performed analysis of concrete carbonization process, including micrographs of the samples, has shown that under the action of carbon dioxide, the surface layer with a thickness of 4 mm and more undergoes structural restructuring. Fibrous formations are destroyed, and the carbonized volume is a heap of loosely bound loose new formations and films blocking the entrances to the capillary system of concrete. They are not a reliable basis for adhesion of “new” and “old” concrete and prevent the penetration of liquid containing cement dissolution products from “new” concrete into the capillaries of the healthy structure of the “old” concrete for their reliable connection.

Keywords: carbon dioxide, adhesion, strength, corrosion, reinforced concrete, hydraulic structures, destruction, structure of cement stone

For citation: Molodin V. V., Anufrieva A. E., Leonovich S. N. (2021) Influence of Carbonization of Concrete Surfaces on their Adhesion with Freshly-Laid Concrete. *Science and Technique*. 20 (4), 320–328. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-320-328> (in Russian)

Введение

Бетон и железобетон – самые широко распространенные материалы в строительстве. Одним из основных факторов, определяющих их широкое применение, наряду с высокой прочностью, универсальностью и возможностью использования местных материалов, является стойкость к агрессивным воздействиям. Поэтому диапазон применения данных материалов необычайно широк – от возведения высотных зданий до устройства портовых сооружений. В приморских районах степень агрессивности воздушной среды увеличивает содержащийся в ней аэрозоль солей морской воды [1]. К воздействию содержащейся в воздухе углекислоты, вызывающей карбонизацию, добавляется хлоридная агрессия, которые, действуя совместно, ускоряют процесс деградации бетона [2].

Проникновение углекислого газа и ионов хлора в железобетонные конструкции стимулирует коррозию арматуры. Карбонизация бетона – коррозия под действием углекислоты – является одним из основных факторов его разрушения, и на нее следует обратить особое внимание.

Агрессивное действие распространенных углекислых газов CO_2 состоит в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образовании в нем соединений, влияющих на свойства бетона. Углекислый газ в бетоне соединяется с растворенным гидроксидом кальция, нейтрализуя его и обуславливая потерю защитных свойств поверхностного слоя бетона. Проникая через поры и капилляры в глубь бетона, углекислый газ,

преодолев защитный слой, достигает арматуры. При накоплении CO_2 в количестве, превышающем критическое, наступает переход стали из пассивного состояния в активное. Слой оксида железа, который защищает арматуру от коррозии, разрушается, и начинается коррозия. Объем продуктов коррозии арматуры значительно превышает объем корродирующего металла. Это вызывает повышенное давление на защитный слой со стороны арматуры. Вдоль арматуры возникают трещины, что впоследствии приводит к отслаиванию защитного слоя бетона [3], к ничем не сдерживаемой коррозии арматуры и разрушению сооружения.

Результаты натурных обследований портовых сооружений на Дальнем Востоке [4, 5] свидетельствуют о постоянном росте количества объектов, требующих ремонта или реконструкции. Это обусловлено приближением сроков эксплуатации к нормативным значениям для большей части сооружений, построенных в 50–60-е гг. прошлого века. Установлено, что глубина проникновения углекислого газа в бетон за 100 лет достигает 90 мм.

Практика восстановления работоспособности конструкций, разрушенных коррозией бетона, предусматривает стандартные способы:

- заделку трещин путем инъектирования в них цементной смеси под давлением до 2 МПа;
- торкретирование с предварительной очисткой поверхности бетона и арматуры от продуктов коррозии, например пескоструйной обработкой;
- обетонирование конструкций с предварительной очисткой поверхностей и устройством дополнительного арматурного каркаса [6].

Эффективность ремонта напрямую зависит от прочности материала восстановления и его сцепления с ремонтируемой конструкцией. Если первое при надлежащих условиях твердения вопросов не вызывает, то обеспечить качество сцепления «старого» (особенно пораженного коррозией) бетона с «новым» совсем не просто. Опыт восстановления портовых сооружений Дальнего Востока показывает, что после восстановления защитного слоя арматуры во многих случаях по плоскости контакта бетона конструкции и бетона восстановления наблюдается появление трещин, заполненных водой.

Сцепление «старого» и «нового» бетонов обеспечивается адгезионным склеиванием материалов по поверхности контакта и за счет проникновения кристаллических сростков из «нового» бетона в поры и капилляры «старого». Причем второй фактор для некорродированной поверхности существенно влияет на сцепление [7]. В условиях, когда «старый» бетон долгое время находился в агрессивной среде, на его поверхности и поверхностях пор и капилляров формируется слой непрочных продуктов коррозии цементного камня, который будет оказывать негативное влияние на сцепление.

Структурообразование и состав цементного камня

Физико-химические процессы твердения цементно-водной системы приводят к образованию прочного конгломерата – цементного камня сложного химического состава и строения. Цементный камень является основным компонентом бетона, определяющим его свойства и долговечность. Долговечность определяется соотношением степени агрессивности воздействий на бетон и стойкостью бетона к агрессивным воздействиям [1, 8].

В портландцементе основную роль при твердении играют силикаты кальция, образующие при соединении с водой гидросиликаты и гидроксид кальция. Процесс структурообразования в портландцементе в ранние сроки до приобретения тестом жесткости характеризуется двумя этапами. На первом количество продуктов гидратации невелико. Незначитель-

ное количество гидросульфалоуминатов кальция типа этtringита, гипса и гексагональных кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не в состоянии создать прочную структуру. В этот период возникают коагуляционные связи между отдельными частицами твердеющей системы. В дальнейшем наблюдается резкий рост пластической прочности. С помощью электронно-микроскопических исследований образцов цемента установлено, что упрочнение структуры происходит благодаря усиленному образованию кристаллов этtringита призматической формы и игольчатых гидросиликатов кальция [9]. Гидросиликаты кальция выделяются в форме устойчивого геля.

Для стойкости цементного камня к коррозионным воздействиям очень важны его фазовый состав и вид новообразований, возникающих при гидратации цемента. Также имеют значение кристаллические формы и размер первичных частиц минералов, слагающих цементный камень.

Диффузия углекислого газа в бетон

Начало изучению процессов газовой коррозии бетона и железобетона положено работами В. И. Москвина, Ф. М. Иванова, С. А. Алексеева, Н. Н. Розенталя [1, 10, 11]. Карбонизация бетона и цементного камня зависит от ряда факторов: технологических (состав бетона, В/Ц, вид и содержание вяжущего, заполнители, добавки, плотность и проницаемость защитного слоя, его поровая структура, условия твердения); условий эксплуатации (агрессивность среды, содержание CO_2 , влажность, солнечная радиация, наличие трещин, температура, направление ветра, давление).

Капиллярно-пористая структура цементного камня в бетоне – его высокоразвитая внутренняя поверхность, в значительной степени определяет интенсивность взаимодействия между внешней средой и бетоном. Коррозионные процессы начинаются на поверхности раздела внешней среды и бетона и развиваются в глубине материала – в порах и капиллярах.

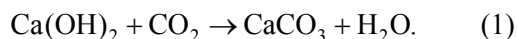
Пористая структура цементного камня бетона обуславливает его способность пропускать газы под действием различных градиентов.

Происходит диффузионный перенос агрессивных компонентов через бетон, содержащихся в газообразной внешней среде, под действием разности концентрации этих компонентов [1].

Действие на бетон газовых сред определяется видом и концентрацией кислоты, конденсирующейся на поверхности и в порах защитного слоя бетона. Агрессивное действие углекислого газа CO_2 состоит в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образовании в нем соединений, влияющих на свойства бетона. Углекислый газ в бетоне соединяется с растворенным гидроксидом кальция, нейтрализуя его и обуславливая потерю защитных свойств поверхностного слоя бетона [3].

Определяющим фактором скорости коррозионных процессов в бетоне является скорость внутренней диффузии. При взаимодействии агрессивного вещества с минералами гидратированного цементного камня или выделяются продукты реакции в твердой фазе, или цементный камень перерождается в конгломерат нерастворимых соединений, поэтому кинетика такого перерождения будет зависеть также от того, в каком виде будут выделяться новообразования: рыхлых осадков или плотных пленок, создающих нарастающее сопротивление диффузии в поверхностном слое твердой фазы в порах [1].

Насыщение углекислотой в бетоне происходит, когда CO_2 в воздухе распространяется через открытые поры бетона, растворяется в воде, находящейся внутри капиллярной поры, и реагирует с растворенным гидроксидом кальция. В результате реакции взаимодействия гидроксида кальция с находящимся в воздухе углекислым газом образуется карбонат кальция

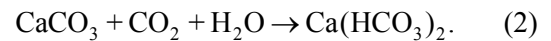


Это приводит к осаждению кристаллов карбоната кальция и выделению воды. Карбонат кальция практически не растворяется в воде, образуя на поверхности бетона пленку [12]. Образовавшийся малорастворимый слой карбоната кальция стремится герметически закрыть поры на поверхности бетона [6].

При карбонизации гидроксида кальция объемом образующего карбоната кальция примерно

на 12 % превышает объем исходного гидроксида кальция. Этот уплотненный карбонатный слой затрудняет развитие обменных реакций [1].

Дальнейшее развитие коррозии происходит за счет реакции карбоната кальция с агрессивной углекислотой. Это приводит к растворению осадка с образованием растворимого бикарбоната, который, вымываясь из бетона, увеличивает объем пор и снижает прочность бетона



Проведенный анализ первоисточников показал, что деструкции бетона в настоящее время посвящено большое количество трудов Е. Е. Шалого, Л. В. Кима, А. В. Степановой, Н. К. Розенталя, В. В. Яковлева и др. [3–5, 11, 13]. Современные работы направлены на математическое моделирование процессов коррозии бетона, методы прогнозирования коррозии бетона, на определение оптимальных областей применения различных бетонов с учетом агрессивности среды, точное назначение мер защиты.

В процессе исследования найдена полезная модель [14], являющаяся прототипом установки для определения кинетики карбонизации бетона Н. К. Розенталя и П. В. Язева [15], оснащенной беспроводной системой управления. Это одновременно и достоинство, и недостаток данной установки. Также разработаны устройства для проведения ремонтных мероприятий на гидротехническом сооружении [16–20], направленные на оптимизацию средств механизации для производства работ. Эти направления являются перспективными для развития теории коррозии и практики защиты бетона от коррозии. Однако данные работы не нашли своего применения для обеспечения качественного сцепления коррозированных поверхностей со свежесделанным бетоном.

В процессе исследования прочности стыков зрелого и твердеющего бетонов в [21] выявлено, что прочность сцепления механически обработанной поверхности с «новым» бетоном выше, чем с необработанной поверхностью бетона. Установлено, что сростки «нового» бето-

на проникают в зрелый бетон с обработанной поверхностью на 33 % глубже. Все это наводит на мысль, что разрушение игольчатых гидросиликатов кальция на поверхности, а также в порах и капиллярах бетона, ранее эксплуатировавшегося в агрессивной среде, является причиной снижения прочности сцепления и ослабления монолитности восстановленного сооружения. Для проверки гипотезы и уточнения результатов проведенных ранее исследований были выполнены ускоренные испытания по определению глубины карбонизации бетона и изучению структуры цементного камня, подвергшегося коррозии.

Методика исследования

Для определения глубины карбонизации образцы бетона подвергались постоянному воздействию агрессивного углекислого газа. Ускоренные испытания проводили по стандартной методике ГОСТ 31383–2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний». Экспериментальная установка (рис. 1) – прототип установки Н. К. Розенталя и П. В. Язева [15]. Для испытания были приготовлены образцы из пескобетона М200 в форме куба размерами 20×20 мм с В/Ц = 0,52. Образцы испытывались после набора бетоном проектной прочности. При проведении испытания в герметичную систему помещали образцы пескобетона при температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(75 \pm 3)\%$. Устанавливалось давление 0,3 МПа.

Каждую неделю образец вынимался и подвергался сколу для определения глубины карбонизации. На поверхность скола наносился

индикатор рН среды – 0,1%-й раствор фенолфталеина в этиловом спирте. Фенолфталеин изменяет свою окраску от бесцветной до малиновой в кислой и щелочной средах соответственно. Изменения глубины проникновения углекислого газа в разные периоды времени изображены на рис. 2.

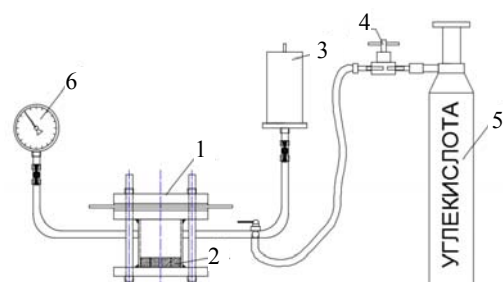


Рис. 1. Установка для испытаний бетона в среде углекислого газа: 1 – герметичная система; 2 – образцы из бетона в форме куба 20×20 мм; 3 – ресивер; 4 – углекислотный редуктор с манометрами; 5 – баллон с CO₂; 6 – манометр

Fig. 1. Installation for testing concrete in environment of carbon dioxide: 1 – sealed system; 2 – samples of concrete in the form of cube 20×20 mm; 3 – receiver; 4 – carbon dioxide reducer with pressure gauges; 5 – CO₂ bottle; 6 – manometer

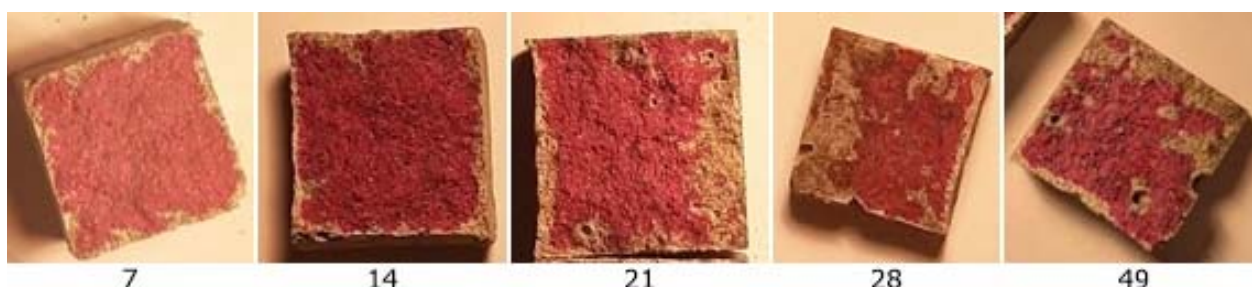


Рис. 2. Фенолфталеиновая проба сколов образцов из пескобетона, выдержанных в среде углекислого газа в разные периоды времени (сут.)

Fig. 2. Phenolphthalein test of chipped samples from sand concrete, kept in carbon dioxide environment at different periods (day)

Кинетика карбонизации бетона описывается первым законом Фика, в соответствии с которым глубина нейтрализации бетона определяется уравнением «корня квадратного от времени» и концентрации агрессивной среды

$$x = \sqrt{2DC_0\tau/m_0}, \quad (3)$$

где x – глубина карбонизированного слоя; D – эффективный коэффициент диффузии CO_2 в бетоне; C_0 – концентрация CO_2 в воздухе; τ – срок эксплуатации; m_0 – реакционная емкость бетона.

Для удобства расчетов уравнение (3) принято записывать в виде

$$x = \sqrt{at}, \quad (4)$$

где $a = 2DC_0/m_0$ – комплексный параметр.

Микроскопом МПБ-2 с кратностью увеличения 24 в направлении, нормальном поверхности образца, измеряли толщину нейтрализованного слоя бетона, которая равна расстоянию от поверхности образца до границы зоны, окрашенной раствором фенолфталеина в малиновый цвет. При обработке результатов рассчитывали среднее значение толщины нейтрализованного слоя бетона. Численные показатели глубины проникновения углекислого газа в бетон отображены на рис. 3. Теоретические значения глубины карбонизации рассчитывались по формулам Приложения В ГОСТ 31383.

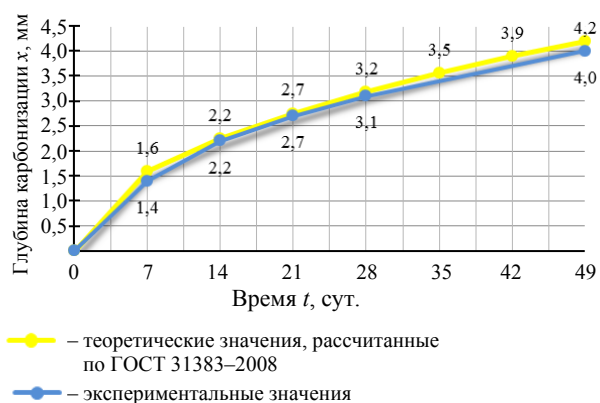


Рис. 3. Скорость карбонизации образцов из пескобетона класса В15

Fig. 3. Sample carbonization rate made of sand concrete of class B15

Образец, находящийся в агрессивной среде углекислого газа 28 сут. (рис. 4), был исследован на электронном сканирующем микроскопе ТМ-1000 в Институте химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН

в трех характерных точках: на поверхности образца, на границе карбонизированной зоны и в зоне, не пораженной коррозией.

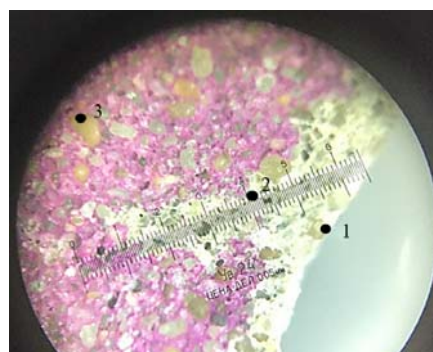


Рис. 4. Микрофотография (увеличение в 24 раза) участка поверхности скола образца, подвергнутого воздействию углекислого газа в течение 28 сут.:

- 1 – точка на поверхности образца;
2, 3 – точка на расстоянии 2 мм и 6 мм от поверхности соответственно

Fig. 4. Micrography (24 times magnification) of sample cleavage surface area exposed to carbon dioxide for 28 days: 1 – point on sample surface; 2, 3 – point at distance of 2 mm and 6 mm from surface respectively

Результаты исследования приведены на рис. 5. Области увеличения в 7000 раз отображены на рис. 5b, d, f. На снимках хорошо видны изменения структуры цементного камня, произошедшие под воздействием углекислого газа. Гидросиликаты кальция, которые выделяются из раствора в виде волокнистых субмикроструктурных частиц, явно видны на рис. 5e в не тронутой коррозией зоне. Они «сшивают» материал, обеспечивая его монолитность и гарантированную прочность [9]. В пограничной зоне (рис. 5c) разрушительная работа углекислого газа, который только что сюда проник, уже началась. Можно воочию наблюдать результаты карбонизации. Еще частично сохранились волокнистые субмикроструктурные частицы гидросиликата кальция, но большая их часть разрушена, и формирующийся материал имеет неустойчивую, комковатую структуру.

В цементном камне, пораженном коррозионными процессами, образуются сложные полиминеральные сростки (рис. 5a). Наблюдается отсутствие видимых игольчатых кристаллов гидросиликата кальция, цементирующую структуру материала, что говорит о разрушении первичной структуры цементного камня и, как следствие, о снижении его когезии.

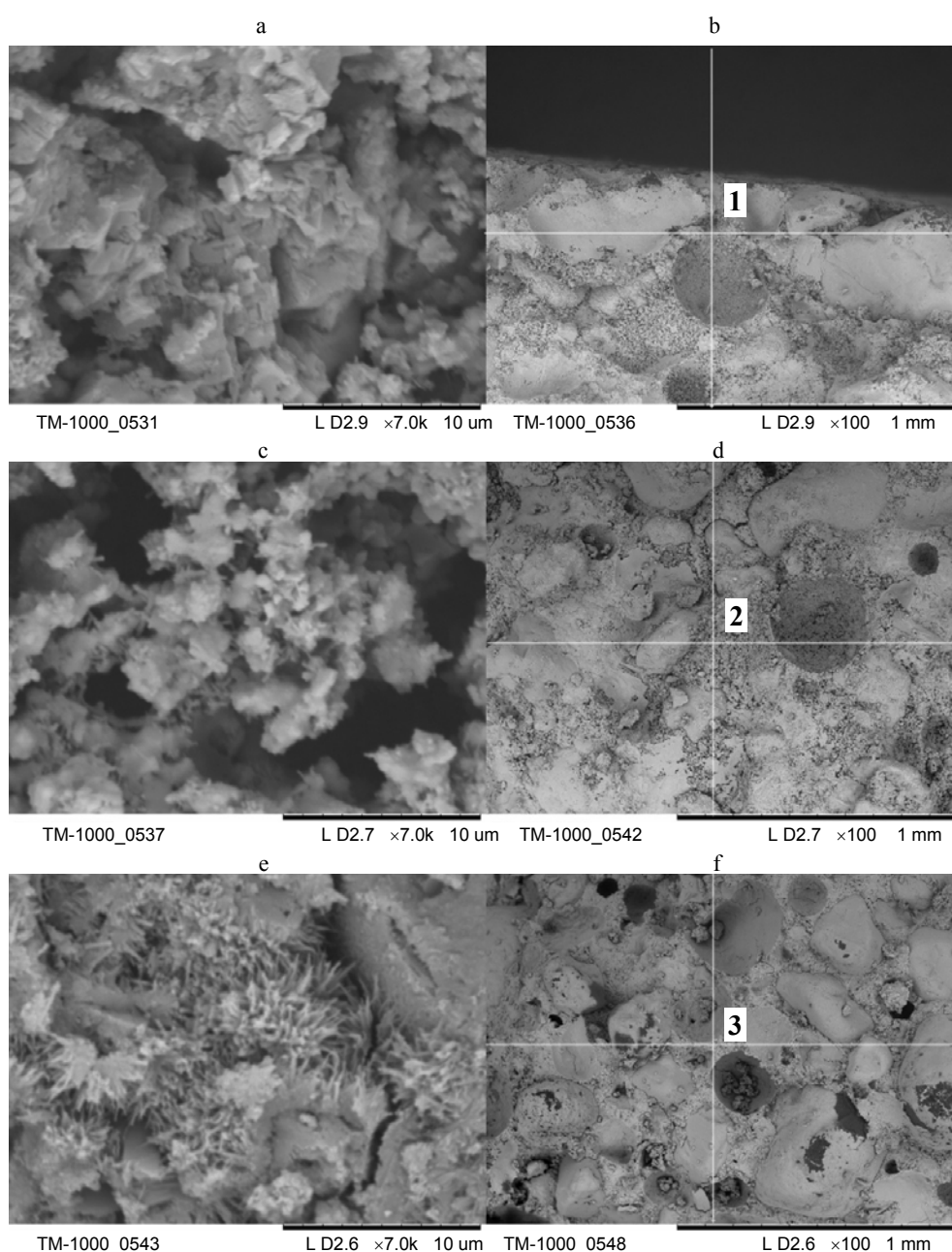


Рис. 5. Структура цементного камня: а, б – на поверхности образца (зона карбонизации) при увеличении в 7000 и 100 раз соответственно; с, д – на расстоянии 2 мм от поверхности (зона частичной карбонизации) при увеличении в 7000 и 100 раз; е, ф – на расстоянии 6 мм от поверхности (некарбонизированная зона) при увеличении в 7000 и 100 раз соответственно

Fig. 5. Structure of cement stone: а, б – on sample surface (carbonization zone) with increase of 7000 and 100 times, respectively; с, д – at distance of 2 mm from surface (zone of partial carbonization) with increase of 7000 and 100 times; е, ф – at distance of 6 mm from surface (non-carbonized zone) with increase of 7000 and 100 times, respectively

ВЫВОДЫ

1. Через поры и капилляры зрелого бетона углекислота проникает в его толщу. При концентрации углекислого газа 5 % она достигает

4,0 мм в первые 49 сут. ускоренной карбонизации, что при пересчете на естественную концентрацию углекислого газа в воздухе достаточно хорошо коррелируется с результатами исследований [4].

2. Микрофотографии структуры цементного камня в областях, пораженных и не тронутых карбонизацией, показывают, что структура материала серьезно меняется и сшивающие ее игольчатые гидросиликаты кальция практически не обнаруживаются, снижая, в конечном счете, его прочность. Это положение подтверждается результатами исследований сцепления «старого» и «нового» бетонов, уложенных с большими температурными градиентами [7].

3. Опыт использования горячих смесей при восстановлении бетонных конструкций, подвергшихся карбонизации, учитывая проникновение новообразований в «старый» бетон на глубину 20–30 мм, показывает, что вновь образовавшиеся цементные сростки могут насквозь прошить пораженные слои и укорениться в неповрежденном материале, что обеспечит надежное сцепление «старого» бетона с «новым».

ЛИТЕРАТУРА

1. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин [и др.]. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
2. Exposure of Mortars to Cyclic Chloride Ingress and Carbonation / J. Backus [et al.] // *Advances in Cement Research*. 2013. Vol. 25, No 1. 3–11. <https://doi.org/10.1680/adcr.12.00029>.
3. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях / С. Н. Леонович [и др.]. Минск: БНТУ, 2016. Ч. 2. 204 с.
4. Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений / Е. Е. Шалый [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 106–113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-2-106-113>.
5. Шалый, Е. Е. Анализ деградации бетона сооружений на острове Сахалин / Е. Е. Шалый // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного государственного технического университета*. 2018. Т. 34, № 1. С. 65–76.
6. Philip, H. *Perkins Concrete Structures: Repair, Waterproofing and Protection* / H. Philip. Applied Science Publishers LTD. London, 1976. 256 p.
7. Молодин, В. В. Сцепление зрелого и твердеющего бетона, уложенного с термообработкой в зимних условиях / В. В. Молодин, Д. А. Иванов // *Известия вузов. Строительство*. 2019. № 4. С. 82–93.
8. Ахвердов, И. Н. *Основы физики бетона* / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
9. Мчедлов-Петросян, О. П. *Химия неорганических строительных материалов* / О. П. Мчедлов-Петросян. М.: Стройиздат, 1971. 224 с.
10. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной сре-

де / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. М.: Стройиздат, 1976. 208 с.

11. Розенталь, Н. К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости / Н. К. Розенталь. М., 2005. 36 с.
12. Овчинников, И. И. Моделирование кинетики деформирования армированных конструкций в специальных эксплуатационных средах / И. И. Овчинников, В. Н. Мигунов, И. Г. Овчинников. Пенза: ПГУАС, 2014. С. 280.
13. Яковлев, В. В. Прогнозирование коррозионной стойкости бетона и железобетона в агрессивных жидких и газовых средах / В. В. Яковлев. Уфа, 2000. 38 с.
14. Установка для определения кинетики карбонизации бетона с беспроводной системой управления: пат. 137728U1 Рос. Федерации, МПК G01N 33/38, C04B 40/00 / В. М. Латыпов, П. А. Федоров, Т. З. Гильмутдинов. Оpubл. 27.02.2014.
15. Установка для определения кинетики карбонизации бетона: а. с. № 388227 (СССР) / Н. К. Розенталь, П. В. Язев. Оpubл. 22.06.1973.
16. Устройство для проведения ремонтных работ на гидротехническом сооружении: пат. 170227U1 Рос. Федерации, МПК E02B 1/00 / В. В. Рублев, С. В. Дедов, С. С. Гучиев, Е. В. Рогожников. Оpubл. 18.04.2017.
17. Устройство для проведения ремонтных работ на различных участках гидротехнических сооружений: пат. 2683479C1 Рос. Федерации, МПК E02B 1/00 / С. В. Дедов, В. В. Рублев. Оpubл. 28.03.2019.
18. Устройство для проведения ремонтных работ на внутренних углах гидротехнических сооружений: пат. 181039U1 Рос. Федерации, МПК E02B 1/00 / С. В. Дедов, В. В. Рублев. Оpubл. 04.07.2018.
19. Устройство для проведения ремонтных работ на угловых участках гидротехнических сооружений: пат. 182712U1 Рос. Федерации, МПК E02B 1/00 / С. В. Дедов, В. В. Рублев. Оpubл. 29.08.2018.
20. Устройство для проведения ремонтных работ на криволинейных участках гидротехнических сооружений: пат. 182778U1 Рос. Федерации, МПК E02B 1/00 / С. В. Дедов, В. В. Рублев. Оpubл. 31.08.2018.
21. Навоян, А. Х. Исследование сцепления твердеющего бетона со зрелым при замоноличивании стыков и ремонте конструкций / А. Х. Навоян, В. В. Молодин // *Труды ИГАСУ*. 2020. Т. 23, № 1. С. 107–121.

Поступила 19.11.2020

Подписана в печать 26.01.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Moskvin V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. I., Guzeev E. A. (1980) *Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods of their Protection*. Moscow, Stroyizdat. 536 (in Russian).
2. Backus J., McPolin D., Basheer M., Long A., Holmes N. (2013) Exposure of Mortars to Cyclic Chloride Ingress and Carbonation. *Advances in Cement Research*, 25 (1), 3–11. <https://doi.org/10.1680/adcr.12.00029>.

3. Leonovich S. N., Litvinovskii D. A., Chernyakevich O. Yu., Stepanova A. V. (2016) *Strength, Crack Resistance and Durability of Structural Concrete under Thermal and Corrosive Effects. Part 2*. Minsk, Belarusian National Technical University. 204 (in Russian).
4. Shalyi E. E., Kim L. V., Leonovich S. N., Stepanova A. V. (2018) Probabilistic Analysis of Depth and Carbonation Front Development in Concrete of Marine Structures. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (2), 106–113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-2-106-113> (in Russian).
5. Shalyi E. E. (2018) Analysis of Concrete Degradation of Structures on the Island of Sakhalin. *Vestnik Inzhenernoi Shkoly Dal'nevostochnogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Far Eastern Federal University School of Engineering Bulletin*, 34 (1), 65–76 (in Russian).
6. Philip H. (1976) *Perkins Concrete Structures: Repair, Waterproofing and Protection*. Applied Science Publishers LTD. London. 256.
7. Molodin V. V., Ivanov D. A. (2019) Bonding of Mature and Hardening Concrete, Laid with Heat Treatment in Winter Conditions. *Izvestiya Vuzov. Stroitelstvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, (4), 82–93 (in Russian).
8. Akhverdov I. N. (1981) *Fundamentals of Concrete Physics*. Moscow, Stroyizdat Publ. 464 (in Russian).
9. Mchedlov-Petrosyan O. P. (1971) *Chemistry of Inorganic Building Materials*. Moscow, Stroyizdat Publ. 224 (in Russian).
10. Alekseev S. N., Rosental N. K. (1976) *Corrosion Resistance of Reinforced Concrete Structures in an Aggressive Industrial Environment*. Moscow, Stroyizdat Publ. 208 (in Russian).
11. Rosental N. K. (2005) *Corrosion Resistance of Cement Concretes with Low and Very Low Permeability*. Moscow. 36 (in Russian).
12. Ovchinnikov I. I., Migunov V. N., Ovchinnikov I. G. (2014) *Modeling of Deformation Kinetics of Reinforced Structures in Special Operating Environments*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction. 280 (in Russian).
13. Yakovlev V. V. (2000) *Prediction of the Corrosion Resistance of Concrete and Reinforced Concrete in Aggressive Liquid and Gas Environments*. Ufa. 38 (in Russian).
14. Latypov V. M., Fedorov P. A., Gilmuddinov T. Z. (2014) *Installation for Determining Kinetics of Concrete Carbonation with Wireless Control System*: Patent No 137728U1 Russian Federation (in Russian).
15. Rosental N. K., Yazev P. V. (1973) *Installation for Determining Kinetics of Carbonization Concrete*: Invention Certificate No 388227 USSR (in Russian).
16. Rublyov V. V., Dedov S. V., Guchiev S. S., Rogozhnikov E. V. (2017) *Device for Carrying out Repair Work on Hydro-Technical Structure*: Patent No 170227U1 Russian Federation (in Russian).
17. Dedov S. V., Rublyov V. V. (2019) *Device for Carrying Out Repair Work on Various Sections of Hydraulic Structures*: Patent No 2683479C1 Russian Federation (in Russian).
18. Dedov S. V., Rublyov V. V. (2018) *Device for Carrying Out Repair Work on Inner Corners of Hydraulic Structures*: Patent No 181039U1 Russian Federation (in Russian).
19. Dedov S. V., Rublyov V. V. (2018) *Device for Carrying Out Repair Work on Corner Sections of Hydraulic Structures*: Patent No 182712U1 Russian Federation (in Russian).
20. Dedov S. V., Rublyov V. V. (2018) *Device for Carrying Out Repair Work on Curved Sections of Hydraulic Structures*: Patent No 182778U1 Russian Federation (in Russian).
21. Navoyan A. Kh., Molodin V. V. (2020) Investigation of Adhesion of Hardening Concrete with Mature Concrete During Monolithing of Joints and Repair of Structures. *Trudy NGASU [Proceedings of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering – SIBSTRIN]*, 23 (1), 107–121 (in Russian).

Received: 19.11.2020

Accepted: 26.01.2021

Published online: 30.07.2021