

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, РАЗРУШЕННЫХ В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ ХЛОРА

В. В. Молодин, д.т.н., профессор; Д. С. Новиков

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»

Аннотация. Для железобетонных конструкций, эксплуатировавшихся долгое время в агрессивной среде, характерна низкая прочность сцепления с вновь уложенным бетоном при восстановлении таких конструкций. Причиной этому служит разрушение, под действием агрессивных агентов, кристаллических сшивающих сростков, отвечающих за сцепление. А традиционные методы восстановления разрушенных железобетонных конструкций, подвергшихся коррозии, не могут обеспечить качественного сцепления «старого» и «нового» бетонов. Установлено, что форсированный разогрев «ремонтной» бетонной смеси при укладке на поверхность бетона, подвергшегося хлоридной коррозии, формирует поток влаги с продуктами растворения цемента из «нового» бетона в «старый», которая продавливается через поврежденный коррозией слой. После отверждения восстанавливается кристаллическая структура, соединяются уложенный и неповрежденный слои ионами хлора. Так обеспечивается прочное сцепление.

Ключевые слова. Сцепление, коррозия, ионы хлора, температурный градиент.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ И АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К самым распространенным агрессивным факторам, ускоряющим разрушение материала железобетонных конструкций, можно отнести воздействие углекислого газа CO_2 и ионов Cl , т.е. процесс карбонизации и хлоридную агрессию [1–2].

Агрессивное воздействие сказывается на кристаллической решетке бетона. В работах Молодина В. В., Ануфриевой А.Е., Леонович С. Н., Навоян А. Х. [3, 4] было установлено, что структура цементного камня серьезно ухудшается, сшивающие игольчатые гидросиликаты кальция исчезают, из-за этого снижается прочность.

Хлорид-ионы, проникая в тело бетона, со временем достигают плоскости арматуры. Сначала они разрушают пассивирующую пленку на поверхности арматурных стержней. Далее ионы хлора начинают контактировать с самой арматурой. В результате этого взаимодействия появляются продукты коррозии (ржавчина), которые будут занимать объем в 2–2,5 раза больший, чем арматура, по причине чего возникнет давление на защитный бетонный слой изнутри конструкции. Сначала образуются трещины, а потом произойдет разрушение защитного слоя бетона [5].

Снижение фактического срока службы ж/б конструкций характерно для: цехов по производству хлора и каустика, хлорной извести, хлорированных органических продуктов; отделений хлорирования химико-металлургических заводов, водопроводных станций, портовых сооружений [6–8].

Проблема заключается в том, что при восстановлении железобетонных конструкций, эксплуатировавшихся в агрессивной среде, традиционными методами [9] не обеспечивается прочное сцепление «ремонтируемого» и «восстанавливаемого» бетонов.

Через некоторое время происходит повторное разрушение в зоне контакта «старого» и «нового» бетонов (рис. 1).

Поэтому целью работы является разработка технологии восстановления железобетонных конструкций, при которой будет обеспечиваться надежное сцепление «ремонтного» и «восстанавливаемого» бетонов.



*Молодин
Владимир Викторович*



*Новиков
Денис Сергеевич*

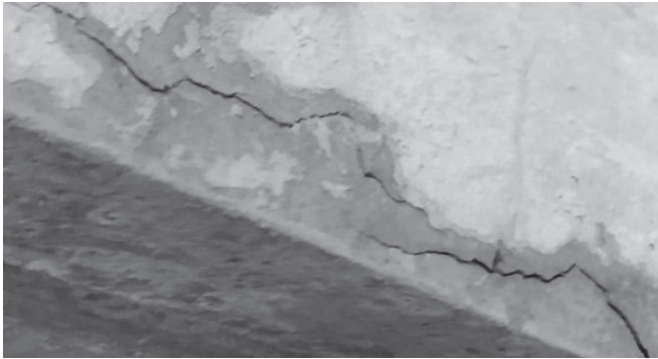


Рис. 1. Отслоение вновь уложенного бетона

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В работе исследовались характер и глубина разрушения структуры бетона под действием хлоридной агрессии на бетон, согласно ГОСТ 31383-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний».

Первым делом были изготовлены образцы из пескобетона в форме куба с размерами 20×20×20 мм, сериями по 15 штук с водоцементным отношением: 0,65; 0,55; 0,45. Образцы выдерживались 28 суток при температуре +20 °С и относительной влажности 75 %. После выдерживания была определена их пористость: 28 %, 25 %, 21 %, соответственно.

Далее образцы помещались в эксикатор, в котором была хлоридсодержащая среда (рис. 2).

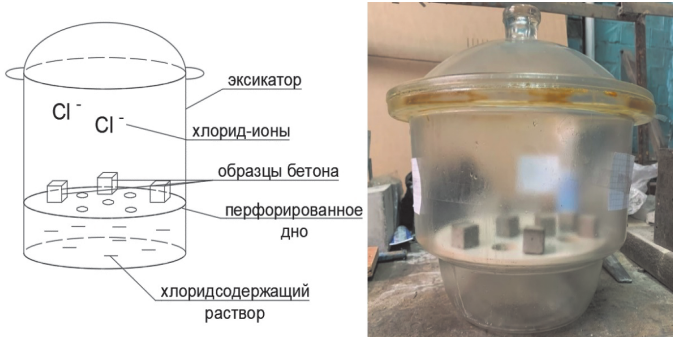


Рис. 2. Экспериментальная установка

Для ускорения эксперимента концентрация хлора была принята 16 г/л. Каждую неделю, на протяжении пяти недель, образцы с разным водоцементным соотношением извлекались из эксикатора, затем скалывались, на поверхность скола наносился раствор йода и крахмала в соотношении 1/2. Раствор изначально имеет темно-синий оттенок. При наличии хлоридов на сколе образца нанесенный раствор осветляется (рис 3).

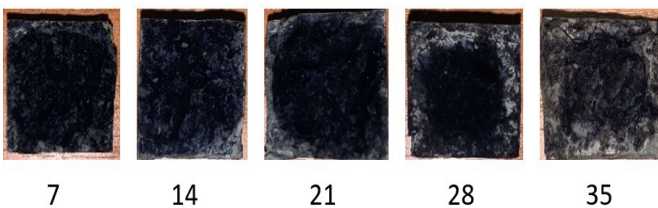


Рис. 3. Следы проникновения ионов хлора вглубь бетона с течением времени

В результате эксперимента был построен график определения глубины проникновения ионов хлора в бетон (рис. 4).

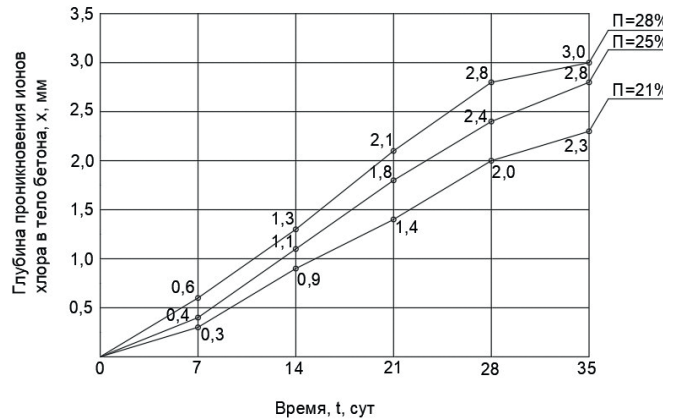


Рис. 4. График глубины проникновения ионов хлора в бетон при разной пористости материала

В Институте химии твёрдого тела и механохимии (ИХТТМ) СО РАН с помощью электронного сканирующего микроскопа ТМ-1000 с увеличением в 5 000 раз были исследованы зоны образцов, поврежденные и не тронутые хлоридами (рис. 5, 6).

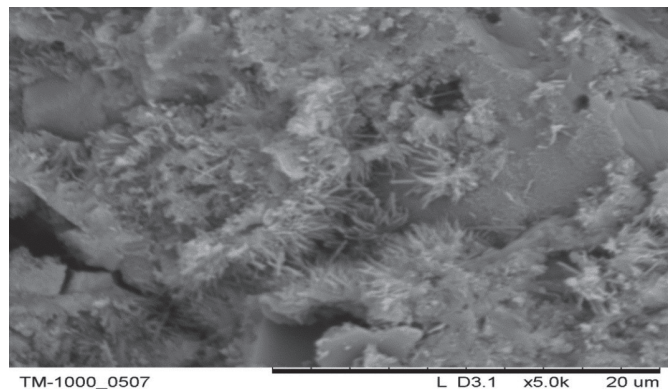


Рис. 5. Микрофотография зоны образца, не тронутой коррозией, при увеличении в 5000 раз

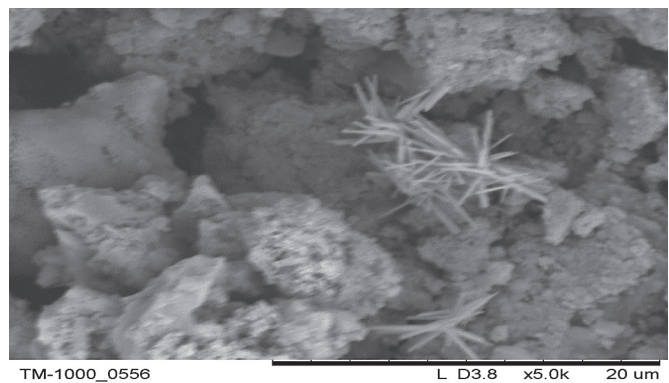


Рис. 6. Микрофотография зоны образца, поврежденной коррозией, при увеличении в 5000 раз

На фотографии здоровой структуры цементного камня наблюдается большое количество волокнистых субмикрорекристаллов гидросиликата кальция, которые прочно сшивают комковатые образования, благодаря этому цементный камень прочный.

На рисунке 6 – разрушенная зона образца хлором. Кристаллической структуры здесь не наблюдается, структура цементного камня утратила свою монолитность. Ионы хлора изменили когезионную прочность материала. Аналогичные результаты были получены при исследовании карбонизации [10, 11].

Чтобы восстановить разрушенные железобетонные конструкции, была предложена гипотеза: применение форсированного разогрева ремонтной бетонной смеси в технологии восстановления железобетонной конструкции, подвергшейся хлоридной агрессии, вызовет появление температурного градиента между укладываемой смесью и восстанавливаемой конструкцией, что в силу возникающей разницы парциального давления формирует поток влаги с продуктами растворения цемента из ремонтной бетонной смеси через систему капилляров поврежденного бетона вглубь восстанавливаемой конструкции. Продукты растворения цемента сформируют новую кристаллическую структуру в зоне коррозионного разрушения и достигнут зоны бетона, неповрежденного коррозией, что в свою очередь обеспечит качественное сцепление ремонтного слоя и восстанавливаемой конструкции.

Чтобы проверить данную гипотезу был проведен эксперимент по определению прочности сцепления «восстанавливаемого» и «ремонтного» бетонов.

Испытания проводились в трех случаях:

1. К бетону, выдержанному в нормальных условиях, укладывалась разогретая смесь.
2. К бетону, выдержанному в агрессивной среде хлора, укладывалась разогретая бетонная смесь.
3. К бетону, выдержанному в агрессивной среде хлора, укладывалась не разогретая бетонная смесь.

В каждом случае испытывались три образца, изготовленные из бетона В20 в форме куба с размерами 100×100×100 мм. Образцы имели металлические, строго отцентрированные анкерные болты М8 с крестовой анкерровкой на конце из стальной проволоки диаметром 6 мм. Анкерровка нужна для лучшей совместной работы анкерного болта с бетоном при испытании на осевое растяжение. Анкерный болт выступал за грань образца, для крепления в захваты разрывной машины.

Изготовленные образцы выдерживались в нормальных условиях 28 сут. После приобретения проектной прочности три образца хранились изолированно от воздействия окружающего воздуха. Шесть других на 28 сут. выдерживались в агрессивной среде хлора с концентрацией хлоридсодержащего раствора 20 г/л.

Спустя 28 сут. выдерживания, образцы помещались в форму, с одной стороны базовый образец с температурой 20 °С, а с другой стороны формы находится анкер (рис. 7).

Далее в 3 формы с образцами, выдержанными в нормальных условиях, укладывалась бетонная смесь, предварительно разогретая до 95 °С (рис. 8-9), чтобы создать температурный градиент 75 °С, который формирует разницу парциального давления и переносит влагу с продуктами растворения цемента из зоны высоких температур (разогретая бетонная смесь) в зону низких температур (базовый образец);



Рис. 7. Подготовка к укладке бетонной смеси

В 3 формы с образцами, выдержанными в агрессивных условиях, укладывалась бетонная смесь, предварительно разогретая до 95 °С;

И в 3 формы с образцами, выдержанными в агрессивных условиях, укладывалась не разогретая бетонная смесь.



Рис. 8. Предварительный разогрев бетонной смеси



Рис. 9. Форма после укладки бетонной смеси

После 28 сут. выдерживания, образцы, согласно ГОСТ 10180-2012 «Методы определения прочности по контрольным образцам» испытывались на осевое

растяжение. Анкерные болты образцов закреплялись в захваты разрывной машины МИ40КУ и нагружались до полного разрушения при постоянной нагрузке 0,05 МПа/с (рис. 10).



Рис. 10. Испытание образцов на осевое растяжение

Результаты испытания образцов на осевое растяжение представлены в виде таблицы 1. Результаты отображались на персональном компьютере в программном обеспечении К40, в котором строился график зависимости линейных деформаций от усилия растяжения (рис. 11).

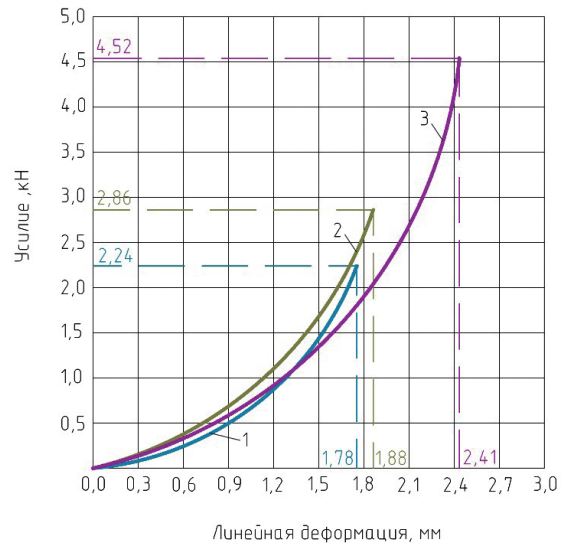


Рис. 11. График зависимости линейных деформаций от усилия растяжения: 1 – образцы, подвергшиеся воздействию агрессивной среды хлора; 2 – образцы, подвергшиеся воздействию агрессивной среды хлора и термообработке; 3 – образцы, подвергшиеся термообработке и твердевшие в нормальных условиях

Таблица 1.

Результаты испытания образцов на осевое растяжение

№ образца	Максимальное усилие, кН	Линейная деформация, мм
1	Образцы, выдержанные в нормальных условиях, с укладкой разогретого бетона	
1.1	5,72	2,66
1.2	4,52	2,45
1.3	3,31	2,12
Средний показатель	4,52	2,41
2	Образцы, выдержанные в агрессивной среде хлора, с укладкой разогретого бетона	
2.1	3,84	2,25
2.2	3,04	1,97
2.3	1,7	1,42
Средний показатель	2,86	1,88
3	Образцы, выдержанные в агрессивной среде хлора, с укладкой не разогретого бетона	
3.1	2,40	1,87
3.2	2,17	1,76
3.3	2,15	1,72
Средний показатель	2,24	1,78



Рис. 12. Внешний вид поверхности образцов, выдержанных в нормальных условиях и с термообработкой при укладке



Рис. 13. Внешний вид поверхности образцов, выдержанных в агрессивных условиях и с термообработкой при укладке



Рис. 14. Внешний вид поверхности образцов, выдержанных в агрессивных условиях и без термообработки при укладке

Если посмотреть на плоскости образцов после разрыва (рис. 12), выдержанных в нормальных условиях, к которым укладывалась разогретая бетонная смесь, то можно увидеть, что на плоскости «нового» бетона видны наросты, вырванные из «старого» бетона. Следовательно, влага с продуктами растворения цемента проникла в тело «старого» бетона, что после ее отверждения дало прочное соединение.

На плоскости «старого» бетона, выдержанного в хлоре (рис. 13), после разрыва осталась небольшая каверна площадью $1 \text{ см}^2 - 1,5 \text{ см}^2$, а на бетоне, который был разогрет, виден нарост.

Плоскости образцов бетона, выдержанного в хлоре, и уложенной бетонной смеси без термообработки (рис. 14) абсолютно плоские. Сцепления не было. Разрыв произошел по плоскости контакта «старого» и «нового» бетонов.

ВЫВОДЫ:

1. Установлено, что эксплуатация железобетонных конструкций в хлорной среде ведёт к разрушению кристаллической структуры цементного камня в зоне контакта с агрессивной средой и снижению его когезионной прочности.

2. Определено, что при концентрации хлора 16 г/л в первый месяц увеличение пораженных зон идёт по нарастающей и достигает $2,3-3 \text{ мм}$ в зависимости от пористости материала.

3. Показано, что форсированный разогрев бетонной смеси при укладке ее на бетонное основание при температурном градиенте $75 \text{ }^\circ\text{C}$ и разницы парциального давления, вызывает мощный поток влаги вглубь бетона. После отверждения продуктов растворения, в разрушенной хлором зоне бетона формируется новая кристаллическая решетка, обеспечивающая сцепление на 27% прочнее, чем при твердении в нормальных условиях.

Список литературы

1. Москвин, В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеева; Стройиздат. — 1980. — С. 536. — Текст : непосредственный
2. Backus, J., Exposure of mortars to cyclic chloride ingress and carbonation / Backus J., Mcpolin D., Basheer M.; *Advances in Cement Research*. — 2013. — Текст : непосредственный
3. Молодин, В. В. Влияние карбонизации бетонных поверхностей на их сцепление со свежееуложенным бетоном / Молодин В. В., Ануфриева А. Е., Леонович С. Н. // *Наука и техника*. 2021. №4. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-karbonizatsii-betonnyh-poverhnostey-na-ih-stseplenie-so-svezheulozhennym-betonom> (дата обращения: 17.04.2023).
4. Молодин, В.В. Форсированный разогрев смеси, как фактор увеличения сцепления бетонов, подвергшихся коррозии / В. В. Молодин, А. Е. Ануфриева, А. Х. Навоян // *Известия вузов*. — 2020. — № 2. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47082844> (дата обращения: 17.04.2023).
5. Аль Каради Али, Основные физикомеханические свойства железобетона / Аль Каради Али // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. — 2013. — № 5. — С. 39-42. — URL: <http://dspace.bstu.ru/bitstream/123456789/1018/1/9.%20Али.pdf>.
6. Шалый, Е. Е. Хлоридная коррозия морского бетона / Шалый Е. Е., Ким Л. В. // *Вестник ИШ ДВФУ*. 2018. №2 (35). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/hloridnaya-korroziya-morskogo-betona> (дата обращения: 17.04.2023).
7. Овчинников, И. И. Применение нелинейной деформационной модели для анализа поведения армированных пластин на упругом основании, взаимодействующих с хлоридосодержащей средой. Основные соотношения / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников // *Magazine of Civil Engineering*. 2013. №1 (36). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-nelineynoy-deformatsionnoy-modeli-dlya-analiza-povedeniya-armirovannyh-plastin-na-uprugom-osnovanii-vzaimodeystviyuuschih-s> (дата обращения: 17.04.2023).
8. Шалый, Е. Е. Железобетон при воздействии карбонизации и хлоридной агрессии: вероятностная модель расчёта прогноза срока службы / Шалый Е. Е., Ким Л. В., Леонович С. Н. // *Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова*. 2018. №6. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zhelezobeton-pri-vozdeystvii-karbonizatsii-i-hloridnoy-agressii-veroyatnostnaya-model-raschyota-prognosa-sroka-sluzhby> (дата обращения: 17.04.2023).
9. Philip H. Perkins concrete structures: repair, waterproofing and protection // *Applied science publishers LTD, London*, 1976. 256 p.- URL: <https://www.uceb.eu/DATA/CivBook/42.%20Repair,%20Protection%20and%20Waterproofing%20of%20Concrete%20Structures,%20P.H.Perkins.pdf>.
10. Бердов, Г. И. Взаимодействие клинкерных минералов с водными растворами хлоридов / Бердов Г. И., Маджаева О. С., Бурученко А. Е., Линник С. И. // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. — 1987. — № 10. — С. 59–63. — URL: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-/Б%2048-962661>
11. Белов, Н. В. Кристаллическая структура силикатов / Н. В. Белов // *Химическая наука и промышленность*. — 1958. — №1, м. 3. — С. 46-50. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17056986>.