

КОРРОЗИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА И ЕГО ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОРКРЕТИРОВАНИЕМ

У статті розглянуті проблеми корозії бетонних і залізобетонних конструкцій, наведено класифікацію основних видів корозійних процесів і зовнішніх факторів, що сприяють руйнуванню залізобетону. Окреслено шляхи застосування торкретування, як одного з головних заходів з ліквідації пошкоджень викликаних корозією.

CORROSION OF REINFORCED CONCRETE AND ITS REHABILITATION BY SHOTCRETING

In article are considered problems corrosion of concrete and reinforced concrete structures, shows a classification of the main types of corrosion processes and external factors contributing to the destruction of reinforced concrete. Outlines ways of applying shotcrete, as one of the main measures to eliminate the damage caused by corrosion.

В прошлом веке при интенсивных темпах индустриализации и роста потребностей мирового хозяйства бетон, армированный стальной арматурой был избран в качестве основного строительного материала. Этот выбор был основан на убеждении, что именно бетон является наиболее прочным и долговечным материалом из всех существующих. Никто не задумывался о том, что через каких-нибудь 40-50 лет многие ответственные железобетонные сооружения будут находиться в аварийном состоянии по причине явления коррозии, разрушительно действующей на металлоконструкции и прочие используемые строительные материалы. Окружающая среда оказалась враждебной для твердого, пористого, искусственно созданного из неорганического связующего (цементного камня) и минеральных заполнителей материала, со скрытым внутри стальным армокаркасом.

В последние годы проблемы коррозии железобетонных сооружений и ее предотвращения становятся все более актуальными. В Украине сотни производственных и гидротехнических (тоннели, каналы, насосные станции водоводы, плотины ГЭС и ГАЭС) сооружений, а также горных выработок [1, 2] нуждаются в принятии срочных и эффективных мероприятий по реабилитации.

Перед тем, как принять необходимые решения, относительно технологии ремонта и восстановления поврежденного железобетона важно, в первую очередь, определить, каким конкретным видам коррозионных процессов подверглась конструкция и какие последствия негативного влияния на неё коррозии.

В настоящее время существует определенная классификация агрессивных воздействий на бетон. На рис. 1 приведена схема, в которой систематизированы наиболее часто встречающиеся виды и типы коррозии, а также прослежена взаимосвязь между некоторыми из них.

Как уже было отмечено, бетон является пористой структурой. Наличие пор в бетоне обуславливается физическими свойствами цементного камня и технологическими факторами производства бетона [3]. Величина пор колеблется в пределах 0,5 нм – 1 мм и выше.

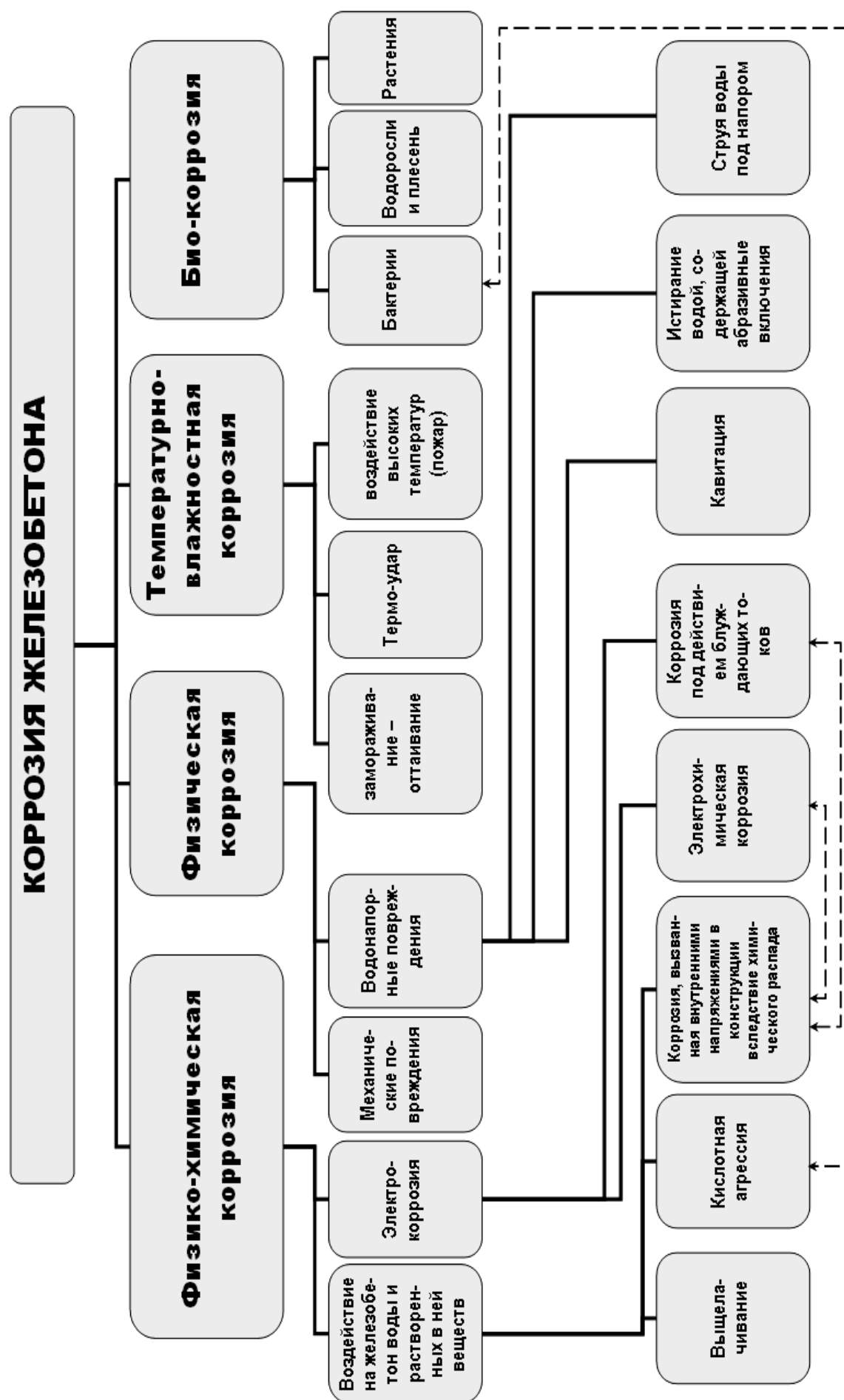


Рис. 1 – Классификация коррозионных процессов в железобетоне

Наименьшими размерами, соизмеримыми с размерами молекул воды, характеризуются так называемые гелевые поры, образующиеся в гидросиликатном геле в процессе гидратации цемента. Их объем в цементном тесте составляет около 28 %.

Однако практический интерес с позиции долговечности бетона представляют собой поры гораздо больших размеров: воздушные (сферические) и седиментационные, служащие своеобразными каналами для циркуляции влаги в теле бетона. Такого рода поры образуются вследствие недостаточно тщательного перемешивания бетонного раствора, либо же из-за применения воздухововлекающих добавок для повышения морозостойкости бетона (рис.2).

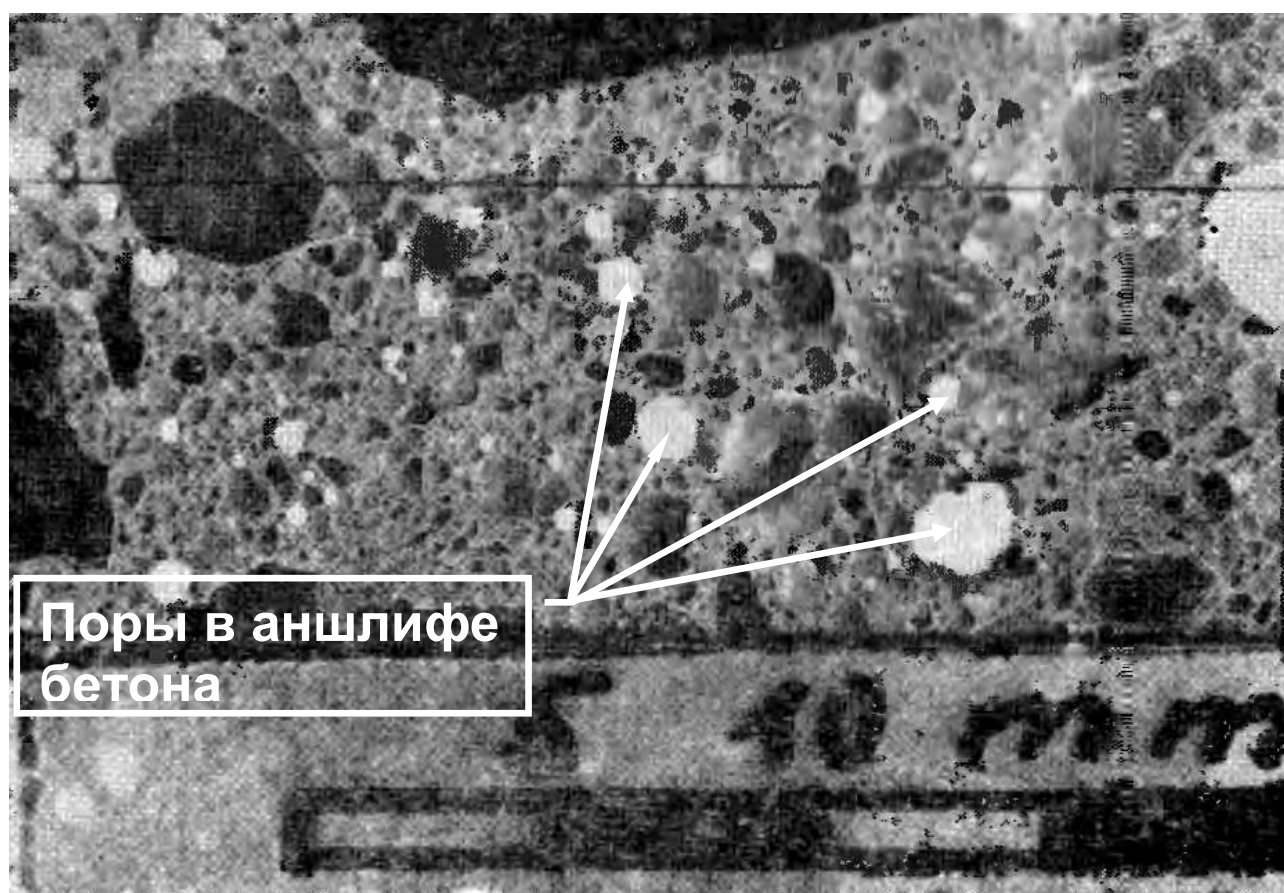


Рис. 2 – Шаровые поры, образуемые воздухововлекающими добавками

Объем относительно крупных по величине пор составляет около 5 % от объема затвердевшего бетона, однако площадь их внутренней поверхности, соприкасающейся с реагентами из внешней среды (различные газы в водном конденсате, растворы кислот и солей), очень велика.

Наиболее часто разрушение бетона происходит во влажной среде. Проф. В.М. Москвин, в своей книге «Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты» [4], разграничивает коррозию по механизмам воздействия на три основных вида. К I виду относятся нарушения, связанные с явлением фильтрации воды сквозь бетонный массив. При такой фильтрации химические вещества, из которых состоит цемент, растворяются и вымываются, а бетон теряет свою

прочность. Этот процесс называется также выщелачиванием, поскольку вымываются гидроксид, гидросиликаты и гидроалюминаты кальция.

Большое значение для повышения устойчивости бетона в условиях возможного выщелачивания имеет процесс карбонизации поверхностного слоя бетона. При карбонизации на воздухе, с содержащимся в нем углекислым газом, образуется труднорастворимый карбонат кальция, который одновременно уплотняет поверхностный слой бетона за счет увеличения объема на 11 % при переходе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в CaCO_3 .

Явление карбонизации имеет также свою негативную сторону, так как способствует разрушению пассивирующей (защитной) пленки на поверхности арматуры. Именно поэтому карбонизация относится ко II виду коррозии, характеризующейся воздействием на железобетон водных растворов кислот и солей.

Дело в том, что за счет реакции углекислоты с гидроксидом кальция щелочная среда в бетоне постепенно переходит в кислую (падение уровня pH до 9 и ниже) [5, 6, 7]. В случае, если карбонизированный слой бетона доходит до поверхности арматуры, то последняя становится практически не защищенной от действия агрессивной по отношению к ней среды. Последствия подобных явлений показаны на графике (рис. 3)

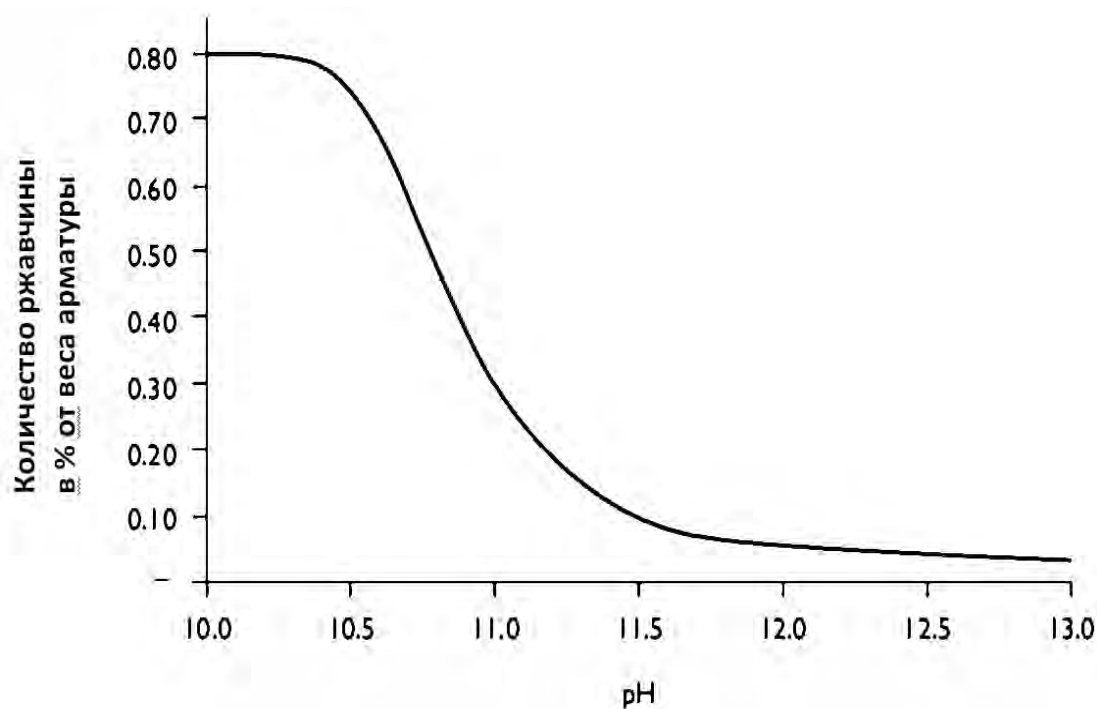


Рис. 3 – Коррозия стали в водных растворах в зависимости от уровня pH

Зависимость глубины карбонизации от ряда факторов [8] проиллюстрирована формулой:

$$Y = \sqrt{2D \cdot \frac{c_1}{c_2} \cdot x}$$

где Y – глубина карбонизации, мм; D – коэффициент диффузии (сопротивляемость прониканию CO_2 – зависит от плотности бетона), $\text{мм}^2/\text{с}$; c_1 – концентрация углекислого газа в атмосфере у поверхности бетона, $\text{гр}/\text{м}^3$ (составляет около $0,6 \text{ гр}/\text{м}^3$); c_2 – необходимое для карбонизации 1 м^3 бетона количество углекислого газа, $\text{гр}/\text{м}^3$ (определяется содержанием свободной гидроокиси кальция в бетоне); x – продолжительность карбонизации, годы.

Примером наиболее активной карбонизации может служить физико-химический процесс, происходящий у оголовка заводских дымовых труб для отвода печных газов. В данном случае оголовки трубы покрываются обильно насыщенным CO_2 водным конденсатом, который в виде угольной кислоты проникает в глубь бетона и разрушает его (рис. 4).[9]



Рис. 4 – Коррозия бетона оголовка заводской дымоотводящей трубы вследствие конденсации агрессивных печных газов

Подобным образом на бетон воздействуют и другие минеральные кислоты: HCl , HNO_3 , HF , H_2SO_4 , H_3PO_4 и др. В процессе их взаимодействия с составом цементного камня, образуется ряд соединений, в частности геля силикатной кислоты и различных по растворимости кальциевых солей, а также гидроксидов железа и алюминия. Продукты реакций скапливаются на поверхности бетона в виде аморфной по своей консистенции массы, создавая тем самым своеобразный защитный барьер и не давая возможности для интенсификации коррозии. Дальнейшее развитие коррозии в этом случае зависит от диффузионной способности реагентов.

Коррозия III вида обусловлена в основном действием на бетон сульфатов, которые в больших количествах находятся в шахтных водах горных выработок. При воздействии на бетон сульфатов (SO_2 , SO_3 , SO_4) происходят реакции с гидроксидом и алюминатом кальция, сопровождающиеся образованием влажных солей, объем которых в 3, а иногда и в 4 раза превышает объем исходных ком-

понентов. На начальной стадии это выглядит как уплотнение бетона (верхних его шаров), однако со временем (в течение нескольких лет), по мере накопления продуктов реакции в поровом пространстве бетона происходит разрушение (разрыв), вследствие нарастания внутренних напряжений в бетонной структуре (рис. 5).

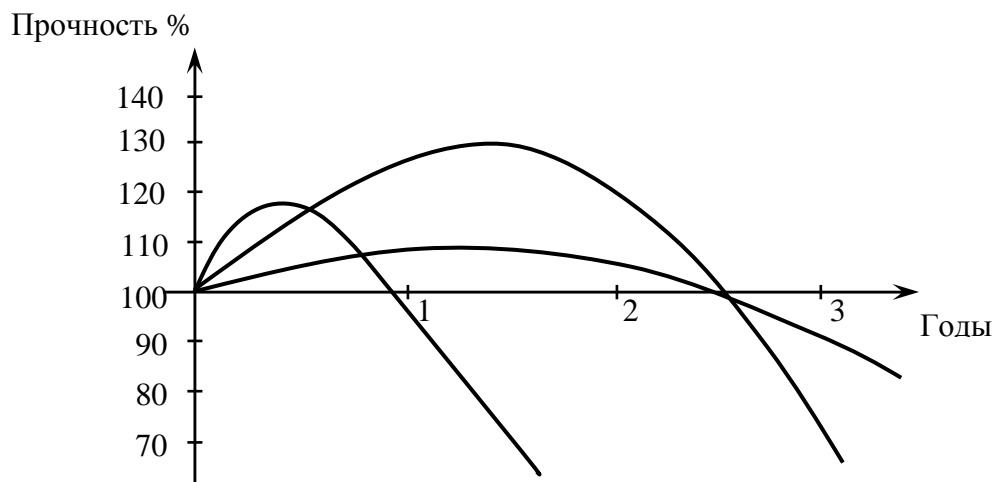


Рис. 5 – Изменение прочности в начальный период действия сульфатов в зависимости от их накопления в цементном растворе

Особым образом на бетон воздействуют хлориды, в частности NaCl [10]. Воздействие растворов солей на железобетон происходит в нескольких направлениях:

- химические реакции с составляющими цементного камня;
- электрохимические процессы коррозии арматуры с участием ионов хлора, содержащихся в солевом растворе (питтинговая коррозия или «хлоридная атака»);
- растворенная в воде соль принимает активное участие в процессе разрушения бетона при воздействии температурно-влажностных факторов.

В результате реакций хлоридов с цементным камнем образуются хлористо-кальциевые соединения. Из-за повторяющихся в течение многих лет химических воздействий может произойти распад вяжущих или разрыв структуры вследствие внутреннего давления, обусловленного образованием соединений большого объема в поровых пространствах бетона.

Особую роль в процессе разрушения железобетона играет коррозия арматуры. Зачастую этот процесс имеет электрохимическую природу, в основе которой лежит катодно-анодная эмиссия. В общем случае реакции происходят за счет разности потенциалов между бетоном (катодом), содержащим влагу, которая одновременно является электролитом, и самим металлом арматуры (анодом). Как уже подчеркивалось выше, на поверхности арматуры существует защитная пленка окиси трехвалентного железа, которая образуется за счет щелочной среды в бетоне. Однако из-за нарушения герметичности укрывающего арматуру бетонного слоя пассивирующая пленка разрушается под действием реагентов из внешней среды. Негативно заряженные ионы хлора активно уча-

ствуют в этом процессе.

Исчерпывающей иллюстрацией к сказанному служит рисунок 6.

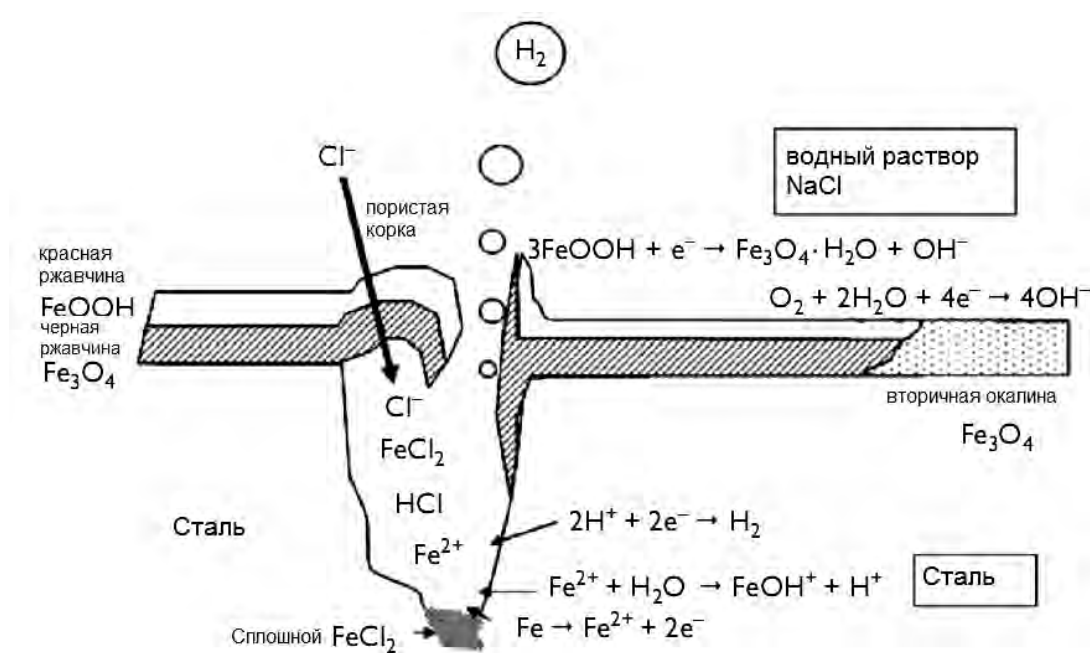


Рис. 6 – Классическая модель питтинговой коррозии; автор – Wranglen G. Corrosion Sci, 1974

Последствия коррозии арматуры весьма значительно сказываются на общем состоянии конструкции. На начальных этапах довольно сложно определить, в каком состоянии находится арматура в бетоне. Разрушения становятся заметными, когда на поверхности конструкции возникают выколы в местах заложения арматуры. Откалывание кусков бетона в данном случае связано непосредственно с нарастанием внутреннего давления в бетонной структуре за счет увеличения слоя ржавчины, объем которой значительно превышает объем исходного материала.

Многие надземные железобетонные сооружения, контактирующие с морской водой и находящиеся в переменных температурно-влажностных условиях, подвергаются комплексу разрушительных воздействий, среди которых определяющее значение имеют факторы перепада температур (замораживание - оттаивание) и чрезмерная засоленность морской воды. Помимо агрессивного физико-химического действия на железобетон растворов солей и хлорид-ионов, коррозии также способствуют периодические смены температуры в воде и в воздухе, которые окружают конструкцию. При накоплении и кристаллизации в поровом пространстве бетона солей и влаги происходят процессы, сходные с теми, которые разрушают бетон при сульфатной агрессии и ржавлении арматуры.

В состав морской воды входят такие агрессивные по отношению к бетону соединения как хлориды натрия, кальция и магния, сульфаты магния. Общее содержание солей в воде морей и океанов колеблется в пределах 13 – 35 гр/л. Можно представить, что происходит с железобетоном в такой среде. Особенно

страдают приливно-отливные зоны морских сооружений находящиеся на участках попеременного увлажнения и высушивания. Кроме накопленных в порах конструктивного элемента малорастворимых соединений, бетон разрывается изнутри кристаллами соли NaCl и льда, расширяющегося на 19 % от жидкой исходной фазы, а в результате электрохимических реакций рвется и предварительно напряженная арматура (рис. 7).

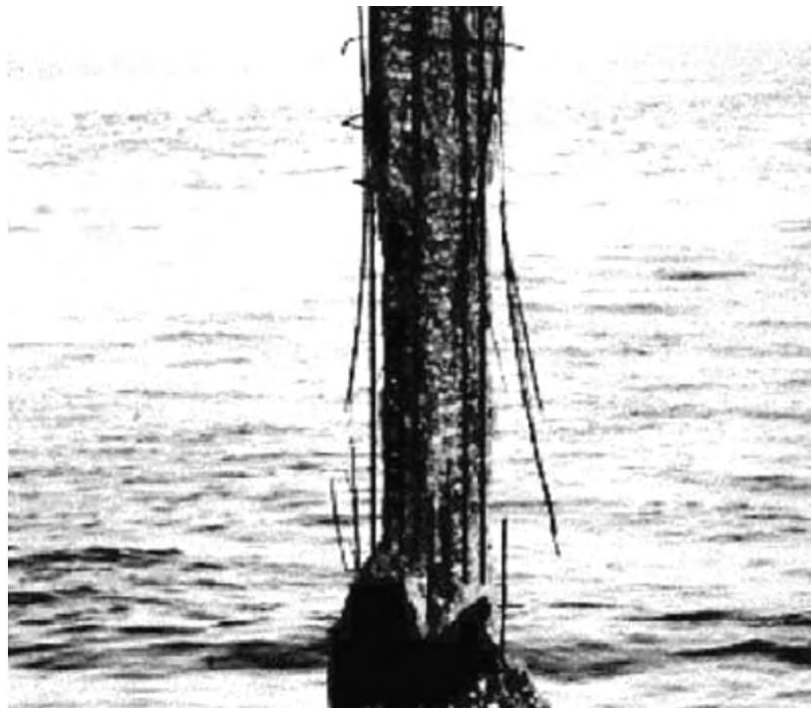


Рис. 7 – Последствия воздействия морской воды и перепадов температур на железобетонную опору причального сооружения (Courtesy NACE International)

Частным случаем «хлоридной атаки» и температурно-влажностного воздействия на бетон может служить следующий пример.

В зимнее время дорожное полотно улиц страдает от гололеда, и чтобы предотвратить негативные последствия этого явления, коммунальные и дорожные службы разбрасывают песок, а в некоторых случаях – антиобледенительные вещества (неочищенную морскую соль). При таянии соленая вода проникает вглубь асфальтобетонного покрытия. Если подобное происходит на дорожном покрытии моста то, стекая по поверхности его наружных элементов (опоры, пилоны, свод), соленый раствор через поры и трещины в конструкциях попадает в бетон и активизирует процесс его деструкции.

Говоря о воде, как о веществе, в котором растворены соли, кислоты и прочие химические реагенты, а также как об ионизированной токопроводящей среде, не стоит забывать о том, что вода может оказывать прямое физическое воздействие на материалы.

Одной из причин, по которым разрушаются бетонные поверхности водосбросов, турбинных водоводов, является кавитация.

При больших скоростях потока воды (> 15 м/с) в местах неровностей граничной поверхности из-за давления возникают пузырьки водяного пара. При

разрыве стенок такого пузырька образуются струйки воды с исключительно высокой скоростью. Происходит серия гидравлических ударов (рис. 8).



Рис. 8 – Прослеживание явления кавитации на стенде в лабораторных условиях

Характерными дефектами кавитационного типа являются неровные выщербленные сколы с острыми краями на поверхности бетона, наличие которых ведет к усугублению кавитации и, как следствие, к еще более интенсивному разрушению покрытия.

Интенсивному износу бетона гидротехнических сооружений способствуют также потоки воды, несущие с собой различные по крупности абразивные включения. Степень разрушения в данном случае зависит от таких факторов, как общая прочность бетона, скорость потока воды, характеристики абразива, вид потока воды (турбулентный или ламинарный), периодичность воздействия и т. д.

Особое внимание стоит уделить термическому воздействию на железобетон огня и сжиженных газов вследствие аварий на производстве и пожарах в железобетонных помещениях.

Как известно даже при относительной влажности воздуха 50 % в капиллярной структуре цементного камня бетона сохраняется влага, являющаяся своеобразным катализатором деструктивных процессов внутри бетона в моменты резкого охлаждения либо нагрева. Во время пожара, например, влага внутри конструкции способствует откалыванию верхнего слоя бетона за счет расширения, однако главной причиной разрушения конструкций служит значительное удлинение арматурных стержней, что ведет к появлению глубоких трещин в бетоне и дальнейшему обрушению (рис. 9)

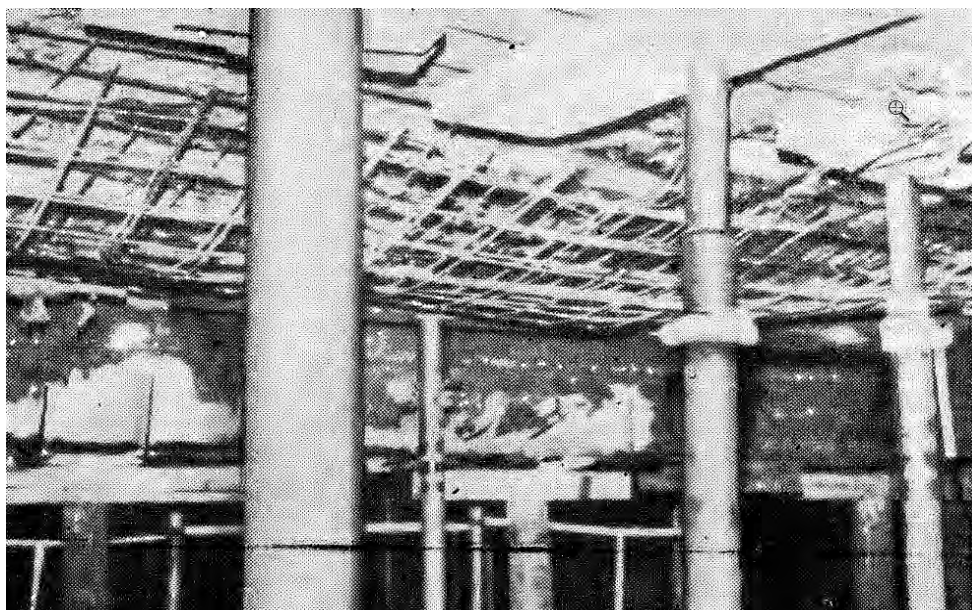


Рис. 9 – Разрушение бетонного потолка и прогибы арматурной сетки вследствие длительного воздействия открытого огня (Г. Руфферт. Дефекты бетонных конструкций.)

Случаи резкого охлаждения (эндотермические реакции) на практике встречаются довольно редко. В основном это последствия утечки или разлития на бетон сжиженных газов: метана, кислорода, азота, водорода, диапазон температур которых находится в пределах от -160°C до -253°C соответственно. Последствиями такого воздействия являются отслоения корки бетона.

Среди множества коррозионных факторов неорганического происхождения способствующих разрушению бетона существует целый ряд биологических факторов. Жизнедеятельность биологических организмов иногда негативно влияет на состояние бетонных конструкций. Тионовые бактерии, обитающие в некоторых водопроводящих сооружениях перерабатывая сероводород, окисляют его до серной кислоты, что в сущности отвечает II виду коррозии по Москвину. Некоторые водоросли и плесень также разрушают структуру бетона за счет реакций метаболизма во влажной питательной среде. В случаях, если плотность бетона очень низкая, а бетонная конструкция заглублена в землю, то в таком случае возможно поражение бетона корнями растений.

В заключение ко всему вышесказанному стоит отметить, что все процессы, связанные с разрушением железобетонных конструкций зависят, в первую очередь от плотности и состава бетона, а также от влажности, концентрации агрессивных веществ в воде и температуры.

Разрабатывая технологические карты по ремонту и восстановлению поврежденных, вследствие коррозии бетонных сооружений проектировщик должен быть проинформирован о комплексе факторов способствовавших разрушению промышленного или гидротехнического объекта [11]. Такие данные можно получить только после тщательно проведенного осмотра с выводами о качественных и количественных видах дефектов.

Главным пунктом при выполнении ремонтно-восстановительных мероприятий является выбор средств и технологии.

Уже более сорока лет технология торкретирования считается основным способом восстановления корродированных бетонных конструкций. Благодаря гибкости регулирования состава торкрет-смесей и режимов торкретирования эта технология стала незаменимой для санации и гидрозащиты железобетонных сооружений [12, 13].

Торкретирование включает в себя комплекс мероприятий: выбор способа набрызга (мокрый – сухой), подбор состава смеси и подготовка восстанавливаемой поверхности.

При подготовке поверхности под набрызг необходимо тщательно ее очистить от продуктов коррозии, масляных пятен, грязи и пыли. В случаях когда сооружение длительное время подвергалось воздействию карбонизации, накоплению в поверхностных слоях бетона нерастворимых продуктов химических реакций, может возникнуть надобность в вырубывании потенциально опасного бетонного слоя. Те же меры применяются при коррозии арматуры (рис. 10).

В зависимости от степени коррозии арматуры и бетона иногда возникает потребность в дополнительном армировании конструкции. В случаях чрезмерного насыщения конструкции арматурой набрызг производят по сухому способу.

Существует огромное количество специальных добавок для раствора, применяющегося при торкретировании. Их подбирают в зависимости от условий, в которых работает сооружение.

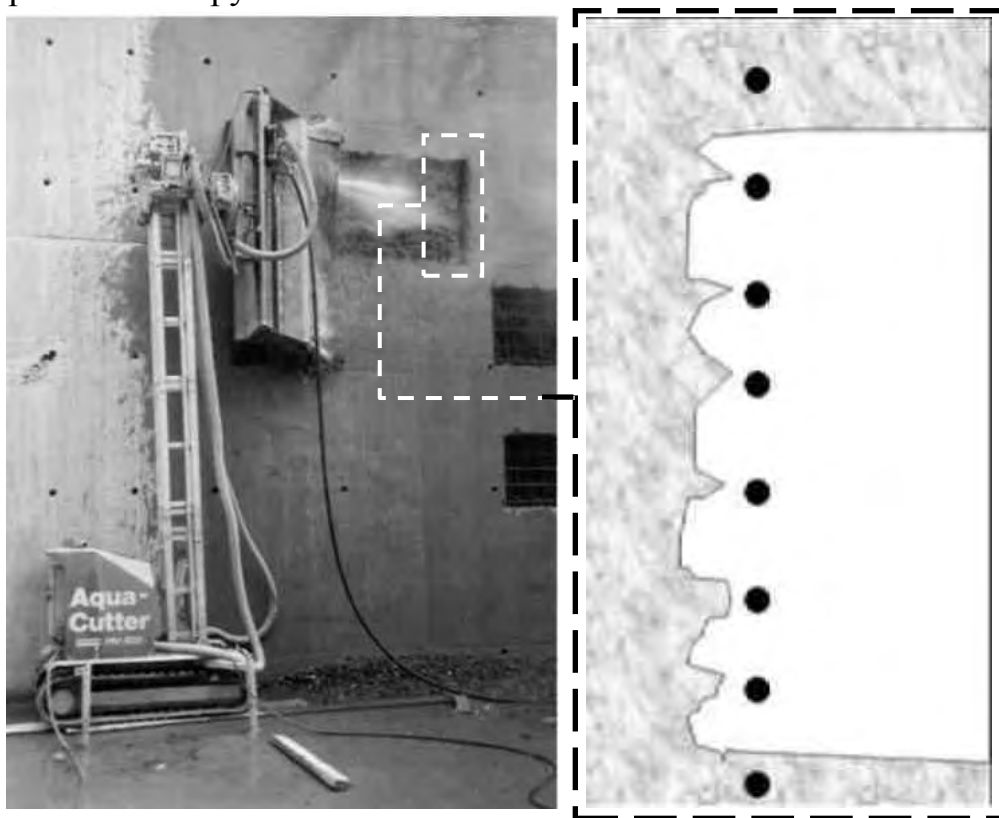


Рис. 10 – Водяная фреза фирмы Courtesy of Aquajet Systems AB удаляет корродированный верхний слой бетона и очищает арматуру

При химической агрессии применяют в основном сульфатостойкие цементы.

В условиях холодного климата применяют особые полимерные воздухововлекающие добавки. В работе [14] представлен ряд рекомендаций по применению морозостойких торкрет-смесей.

Авторы утверждают, что на практике лучшие результаты показывает торкрет-смесь с мелким заполнителем менее подвержена негативному воздействию низких температур. Торкрет-смесь должна быть уплотнена и не содержать пустот. Нельзя использовать «бедные» смеси. Водоцементное отношение в таком растворе не должно превышать 0,45.

Питер С. Татнал [15] в своей работе, посвященной взрывному откалыванию бетона в огнеупорных торкрет-панелях доказывает, что торкретбетон без особых полимерных волокон более подвержен коррозии при действии высоких температур.

Было показано, что использование тонкого полипропиленового моноволокна (приблизительно 6 денье, или 0,0012 дюймов (30 мкм) в диаметре) ослабляет последствия взрывного откалывания при воздействии огня, поддерживаемого углеводородными источниками.^{8,9} Серьезно отличающиеся друг от друга тепловые характеристики полипропиленового волокна и матрицы торкретбетона вызывают раскрытие микротрещин на поверхности раздела между волокнами и матрицей, т.к. при нагревании скорость расширения волокон не совпадает со скоростью расширения матрицы.⁸ Эти маленькие просветы позволяют давать выход давлению пара в сооружении. Результаты исследования, проведенного центром Hagerbach в отношении торкретбетона, показали, что торкретбетон можно сделать огнеупорным с использованием этой же технологии. Более того, испытание центра Hagerbach доказывает, что включение крупных волокон из стали или полипропилена не оказывает влияния на процесс взрывного откалывания, который происходит при воздействии на торкретбетон огня по условиям кривой RWS. Вероятнее всего, это происходит вследствие различного количества волокон в матрице – более 52 млн. волокон на фунт (114 млн. волокон на кг) в случае с микроволокном против всего лишь 9 000 -13 000 волокон на фунт (20 000 – 30 000 волокон на кг) при использовании крупного волокна (рис. 11).

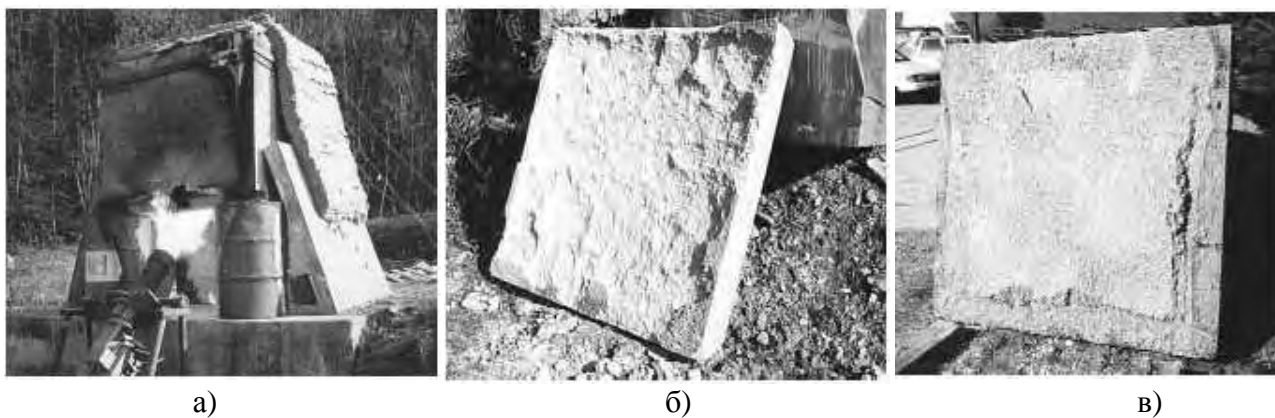


Рис. 11 – Огнеупорные испытания образцов торкретбетона

а) Печь Hagerbach, работающая на дизельном топливе; б) Панель, армированная сеткой, без включения волокон: через 15 минут воздействия огня; в) Вид панели из торкретбетона со стальными и тонкими полипропиленовыми волокнами после двухчасового испытания

В таблице 1 [16, 17] регламентированы случаи в которых следует применять технологию торкретирования для санации и восстановления ответственных сооружений

Таблица 1 – Требования к изоляции

Требования к изоляции	Торкрет-штукатурка	
	На цементе	С полимерными добавками
По величине напора: - противокапиллярная; - нормальная (напор до 10 м); - усиленная (напор > 10 м); - при работе на отрыв	- + + +	- + ++ ++
По условиям производства работ: - строительная площадка - зимние условия	+ О, с	+ О, с
По химической агрессивности воды-среды: - выщелачивающая - общекислотная; - углекислотная; - магнизиальная; - сульфатная; - нефтехимическая	- - + - - О, окр.	+ - + + + +
Обозначения: «+++» - имеет безусловное преимущество; «+» - рекомендуется; «-» - не рекомендуется; «О» – требуются дополнительные мероприятия; «с» – со специальным подбором состава; «окр.» – с дополнительной окраской поверхности.		

Анализируя данные таблицы 1, можно сделать вывод о том, что торкрет-штукатурка с полимерными добавками имеет безусловные преимущества перед другими технологиями по восстановлению бетона, однако вопросы подавления капиллярной фильтрации и надежной защиты в условиях агрессивной кислотной среды остаются открытыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / Виноградов В.В.; Отв. Ред. Зорин А.Н.; АН УССР. Ин-т. геотехн. Механики. – Киев: Наук. Думка, 1989. – 192 с. – ISBN 5-12-000877-1.
2. Свойства пород и устойчивость горных выработок / Усаченко Б.М. – Киев: Наук. думка, 1979. – 136 с.
3. Долговечность железобетона в агрессивных средах: [Совм. изд. СССР – ЧССР – ФРГ] / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шисель. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.: ил. – ISBN 5-274-00923-9.
4. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. – М.: Стройиздат, 1980, 535 с.
5. С.Н. Алексеев. Коррозия и защита арматуры в бетоне / Алексеев С.Н. [2-е изд.] переработанное и дополненное; *Госстрой СССР, Научно-исследовательский институт бетона и железобетона.* – М.: Издательство литературы по строительству, 1968. – 228 с.
6. John P. Broomfield. Corrosion of Steel in Concrete. Understanding, investigation and repair. / John P. Broomfield. – [2nd edition]. – London and New York: «Taylor and Francis», Taylor and Francis group, 2007. – 277 p. Master

e-book ISBN. ISBN 0-203-41460-8.

7. Ингибиторы коррозии стали в железобетонных конструкциях / С.Н. Алексеев, В.Б. Ратинов, Н.К. Розенталь, Н.М. Кашурников. – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с., ил.

8. Г. Руфферт. Дефекты бетонных конструкций. / Г. Руфферт.; *Пер. с нем. И.Г. Зеленцова.* / Под ред. В.Б. Семенова. – М.: Стройиздат, 1987. – 111 с.

9. Shotcrete • Fall 2006

10. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин оборудования и сооружений: Справочник: В 2 т. Т. 2 / Под ред. А.А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1987. – 784 с., ил.

11. Ф. Перкинс. Железобетонные сооружения: Ремонт, гидроизоляция и защита. / Ф. Перкинс.; *Пер. с англ.* / Под ред. М.Ф. Цитрона. – М.: Стройиздат, 1980. – 256 с., ил.

12. Воронин В.С. Набрызгбетонная крепь. / Воронин В.С. М., Недра, 1980. – 199 с., ил.

13. Бетонная крепь технология и механизация её возведения / Ю.З. Заславский, В.П. Киндур, Е.А. Лопухин, Ф.И. Перепичка. – Донецк: «Донбасс» Редакция производственно-технической литературы, 1973. – 183 с.

14. "Development of Durable Dry-mix Shotcrete in Quebec", Shotcrete, V 3, No. 2, Spring, 2001, pp. 18 – 20

15. Огнеупорность торкретбетона: влияние добавления волокон на взрывное откалывание. Питер С. Татнал «Торкретбетон» весна 2003

16. Единая система защиты от коррозии и старения. Основные положения: ГОСТ 9.101-2002. – [Дата введения 2004—01—01]. – М.: Межгосударственный стандарт, 2004. – 4 с.

17. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования: ГОСТ 31384-2008. – [Дата введения 2008—01—01]. – [офиц-е изд.]. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС).= *Interstate council for standardization, metrology and certification (ISC).*; Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС), 2009. – 69 с.: – (Межгосударственный стандарт)