

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ, ПРИВОДЯЩИЕ К РАЗРУШЕНИЮ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	8
2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ, ДЕФЕКТОВ И ТРЕЩИН БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	16
3. АЛГОРИТМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О РЕМОНТЕ ИЛИ ЗАМЕНЕ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ	21
3.1. Порядок выполнения ремонтно-восстановительных работ	21
3.1.1. Капитальный ремонт и реконструкция	22
3.1.2. Предварительные мероприятия	23
3.2. Обследование и мониторинг бетонных и железобетонных конструкций.....	23
3.3. Неразрушающие методы контроля бетонных и железобетонных конструкций.....	26
4. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	30
4.1. Нормативная документация, регламентирующая проведение ремонтно-восстановительных работ бетонных и железобетонных конструкций	30
4.2. Основные принципы ремонта и восстановления бетонных и железобетонных конструкций	33
5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ РАБОТ	36
5.1. Материалы для ликвидации активных протечек воды в подземные сооружения	37
5.1.1. Инъекционные полиуретановые составы.....	42
5.1.2. Акрилатные и метакрилатные инъекционные составы.....	46
5.1.3. Гидропломбы на цементной основе	49
5.2. Материалы для подщелачивания и противокоррозионной защиты поверхности бетонных и железобетонных конструкций	53
5.3. Материалы для устранения грибковых образований и плесени на поверхности бетонных и железобетонных конструкций	56
5.4. Материалы для гидрофобизации бетонных поверхностей строительных конструкций	57
6. ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	64
6.1. Гидроизоляционные материалы на основе расширяющихся цементов	66
6.2. Гидроизоляционные материалы проникающего действия.....	66
6.3. Материалы для устройства шовной и обмазочной гидроизоляции	74
7. РЕМОНТНЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕМОНТА БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	82
7.1. Требования к ремонтным составам, используемых для восстановления и ремонта бетонных и железобетонных конструкций	82
7.2. Ремонтные составы на основе минеральных вяжущих веществ	88
7.3. Ремонтные материалы на основе полимерцементных композиций.....	100
7.4. Ремонтные составы на основе полиэфирных и эпоксидных композиций	108
8. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ БЕТОНОВ	111
8.1. Технология биологического восстановления бетонов	111
8.2. Механизм биоминерализации	113
8.3. Применение бактерий для модификации бетонов	114
8.4. Анализ видов применяемых бактерий в качестве биокон компонента добавок для самовосстанавливающихся бетонов.....	115
9. УСИЛЕНИЕ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ	119
9.1. Внешнее армирование бетонных и железобетонных конструкций полимерными композиционными материалами.....	120
9.2. Материалы, используемые для усиления бетонных и железобетонных конструкций	123
9.3. Технология производства работ по усилению бетонных и железобетонных конструкций.....	127
Библиографический список.....	129

ВВЕДЕНИЕ

Железобетонные конструкции (ЖБК) различного функционального назначения имеют множество дефектов, возникающих как в процессе их производства, так и в период эксплуатации зданий и сооружений. Особенно сильное влияние на долговечность бетонных и железобетонных конструкций оказывает внешнее воздействие агрессивных сред, усиленное погодными и климатическими условиями. Со временем это приводит к разрушению бетона, коррозии арматуры и ослаблению ЖБК. По статистике от 15 до 75 % строительных конструкций зданий и сооружений различного функционального назначения подвергаются воздействию агрессивных сред, а от 5 до 10 % ежегодно разрушается вследствие коррозии. При этом требуют замены от 10 до 25 % элементов строительных конструкций задолго до полного износа зданий и сооружений, а продолжительность межремонтного периода не превышает 8 лет. Из-за отсутствия периодических ремонтно-восстановительных работ по устранению появляющихся дефектов и повреждений конструкции быстро приходят в неработоспособное состояние. Очень часто это приводит к преждевременному выходу из строя ЖБК, требующей немедленной замены.

Анализ строительного рынка показал, что с ростом количества вновь возводимых зданий и сооружений происходит и увеличение объема ремонтно-восстановительных работ. В настоящее время в индустриально развитых странах инвестиции в новое строительство и в ремонт существующих зданий и сооружений практически сравнялись. Поэтому железобетонные сооружения, построенные несколько десятилетий назад, требуют качественного ремонта с использованием современных высокотехнологичных материалов. В развитых странах ежегодные расходы на ремонт ЖБК составляют до 5 % ВВП.

Анализ технического состояния бетонных и железобетонных конструкций различных зданий и сооружений показал, что наиболее часто встречаются следующие виды разрушений:

- трещины различной природы с шириной раскрытия более 0,5 мм;
- разрушения бетона различного характера глубиной от 5 до 30 мм;
- разрушение защитного слоя бетона над арматурой и снижение его толщины на 20 % и более;
- коррозия арматуры со снижением диаметра (до 5 % и более) в результате карбонизации или разрушения защитного слоя бетона;
- шелушение и увеличение пористости поверхности бетонных и ЖБ конструкций до 50 %.

В крупных мегаполисах с продолжительным зимним периодом из-за активного применения противогололедных хлорсодержащих реагентов и перенасыщенности автомобильным транспортом, выделяющим огромное количество CO_2 , соединений серы и других химических активных соединений, наблюдается высокая скорость карбонизации и коррозии бетона, а также значительная скорость проникновения в его структуру соединений хлора. Разрушение железобетонных подземных сооружений (коллекторов) происходит в основном вследствие выщелачивания и карбонизации бетона, а также хлоридной и сульфатной коррозии бетона.

Ремонтно-восстановительные работы бетонных и железобетонных конструкций ставят всегда одну и ту же задачу: подобрать ремонтный состав, которым можно восстановить конструкции так, чтобы они обрели не только первоначальную форму и внешний вид, но и заданные проектной документацией эксплуатационные свойства на последующий длительный срок их эксплуатации, т.е. чтобы ремонтный состав стал составной частью восстанавливаемых конструкций. Это достигается применением ремонтных составов, обладающих минимальными усадкой при твердении и разницей коэффициентов линейного температурного расширения ремонтного материала и материала восстанавливаемой конструкции.

Сложность восстановления ЖБК подземных сооружений состоит и в том, что в таких конструкциях очень часто присутствуют открытые течи, а также приток воды по швам и стыкам. Основной причиной протечек воды обычно является неправильно выбранная система гидроизоляции подземного сооружения и/или ошибочный подбор гидроизоляционных материалов.

Чаще всего протечки воды внутрь подземного сооружения обусловлены совокупностью указанных выше причин.

Многолетние исследования и опыт эксплуатации ЖБК показывают, что трещины не влияют на продолжительность эксплуатации конструкций до тех пор, пока они пассивны или являются поверхностными, а ширина их раскрытия не превышает допустимой величины. При наличии сквозных трещин, проходящих через защитный слой бетона, не только обнажается металлическая арматура, что приводит к ее последующей коррозии, но и существует большая вероятность проникновения воды внутрь конструкции. Поэтому придание повышенной водонепроницаемости бетону строительных конструкций может значительно повысить их коррозионную стойкость и продлить срок безремонтной эксплуатации в течение длительного времени.

Для защиты строительных конструкций от агрессивного воздействия влажного воздуха и других атмосферных факторов окружающей среды, поглощения почвенной или грунтовой влаги, фильтрации и просачивания воды через них используют вторичную гидроизоляцию с применением различных гидроизоляционных материалов. Их используют при наружной и внутренней защите подземных сооружений (коллекторов, тоннелей, сводов, траншей и т.п.) от воздействия грунтовых вод. Вторичная гидроизоляция не только предохраняет бетонные строительные конструкции от контакта с водной средой, но и обеспечивает защиту бетона от воздействия агрессивных паров, газов и других химических соединений.

Гидроизоляционные материалы так же подвержены воздействию ультрафиолетовых лучей, переменной температуры, кислорода и озона в воздухе, ветра и атмосферных осадков, микроорганизмов, агрессивных жидких сред и газов в сочетании с силовыми нагрузками и другими внешними воздействиям. Разрушение гидроизоляционных материалов, как правило, происходит в результате неблагоприятного сочетания сразу нескольких нагрузок и воздействий различного характера в период эксплуатации.

Для предотвращения коррозионного разрушения бетонных и ЖБ конструкций используют не только первичную и вторичную гидроизоляцию, но применяют также другие меры, ограничивающие или исключающие воздействие агрессивной среды на бетонные и ЖБ конструкции. Наиболее часто при ремонте и гидроизоляции ЖБК используют защитные пропиточные составы (полимерсодержащие защитные эмульсии и суспензии, инъекционные гели, мастики) и полимерцементные обмазочные, штукатурные, антикоррозионные и кольматирующие составы. Выбор гидроизоляционных составов определяется условиями эксплуатации зданий и сооружений и характером разрушения строительных конструкций.

Сухие штукатурно-обмазочные и гидроизоляционные смеси в России выпускают более 100 компаний: ООО «Пенетрон-Россия», ООО «Кальматрон», ООО «Гидротекс», ООО «КТ ТРОН», ООО «РАСТРО», ООО «Гидрозо», ООО «ГЛИМС», ООО «АКВАТРОН БКХ», АО «Триада-Холдинг», ООО «Спектрон», ООО «Бирсс», ООО «Производственная компания «Бастион» и другие. В РФ емкость рынка гидроизоляционных сухих смесей, по данным Агентства строительной информации, оценивается в объеме более 50 тыс. т в год. При этом предприятия, расположенные в регионе ЦАО, выпускают более 30 тыс. т в год.

Среди зарубежных компаний-производителей гидроизоляционных составов следует отметить такие фирмы, как BASF Construction Chemical, SIKА, MAPEI, Minova, SCHOMBURG, Henkel, Index, Mc Bauchemie, Grace и многие другие. Ассортиментный перечень всех видов защитных гидроизоляционных материалов на территории РФ составляет более 2 тыс. наименований.

Для заделки трещин, возникших при эксплуатации зданий и сооружений различного назначения, широко используются сухие строительные смеси на цементной основе. Такие смеси должны обладать хорошими удобоукладываемостью и тиксотропией, отсутствием водоотделения, иметь низкое водоцементное отношение, нулевую усадку при твердении, быстрый набор прочности и высокие физико-механические характеристики (водонепроницаемость, прочность сцепления со сталью и бетоном) и обеспечивать требуемую долговечность.

В последние годы значительно расширился рынок ремонтных составов, обладающих широким спектром разнообразных технологических и эксплуатационных свойств. При этом несколько типов таких составов могут удовлетворять проектными критериями для обеспечения надежного ремонта ЖБК. Поэтому при выборе ремонтного материала следует учитывать не только его стоимость, но и технологию нанесения, наличие квалифицированных рабочих и необходимого технологического оборудования. Одновременно следует руководствоваться принципом: ремонтировать подобное подобным. И лишь в тех случаях, где это невозможно, следует использовать другие эффективные ремонтные материалы.

При толщине ремонтного слоя менее 10 см, применяются растворы из специальных сухих строительных смесей. Они предпочтительны и при небольших объемах работ. При толщине ремонтного слоя несущих конструкций свыше 10 см используют специальные растворы с добавлением щебня (до 40 % по массе) либо бетоны, приготавливаемые на основе специальных цементов, обеспечивающих безусловность и быстрый набор прочности. Ремонт массивных конструкций с большими повреждениями допускается выполнять с использованием бетонов на портландцементе, а при ремонте вертикальных, потолочных и наклонных поверхностей применяют тиксотропные бетоны из сухих строительных смесей. В ремонтные составы рекомендуется добавлять металлические, полимерные и минеральные щелочестойкие волокна, различные виды модифицирующих и воздухововлекающих добавок, ускорители твердения, компенсаторы усадки и добавки, увеличивающие адгезию.

При значительной потере площади сечения арматуры (свыше 10 %) вследствие ее коррозии в качестве ремонтных составов применяют специальные фибробетоны, изготавливаемые из сухих смесей. Благодаря высокой прочности при растяжении такие бетоны компенсируют снижение несущей способности арматуры. Активные (дышащие) трещины могут обращаться в неактивные за счет соответствующего усиления конструкции, восстанавливающего ее монолитность. Другим вариантом ремонта активных трещин является заполнение их полимерными ремонтными составами с большим удлинением при разрыве. Неактивные трещины герметизируют инъектированием в них ремонтного состава, обладающего хорошей адгезией к бетону.

При восстановлении водонепроницаемости бетонных конструкций подземных сооружений могут использоваться материалы проникающего действия, механизм действия которых заключается в проникновении в капиллярно-пористую структуру бетона под воздействием осмотического давления химически активных веществ, которые взаимодействуют с продуктами гидратации портландцемента, образуя нерастворимые кристаллы, заполняющие (кольматирующие) микротрещины, поры и капилляры бетона, перекрывая пути фильтрации воды.

В настоящее время для ремонта и восстановления ЖБК широкое применение получили полимерные материалы на основе реакционноспособных мономеров и олигомеров. Выбор указанных материалов для гидроизоляции и ремонта строительных конструкций зависит от вида повреждений, дефектов и наличия трещин в бетонных и железобетонных конструкциях.

Для восстановления несущей способности бетонных и ЖБ конструкций без прекращения эксплуатации зданий и сооружений в максимально короткие сроки применяют технологию внешнего армирования ЖБК полимерными композиционными материалами (ПКМ) на основе углеродных лент, тканей, сеток и ламинатов. Такая технология позволяет осуществлять ремонт, восстанавливать и увеличивать несущую способность ЖБК сжимаемых и изгибаемых конструкций с минимальными трудозатратами по сравнению с традиционными способами. Технология внешнего армирования ПКМ имеет широкую область применения и минимальные трудовые затраты на проведение работ. В силу легкости используемых материалов система внешнего армирования не создает дополнительной нагрузки на конструкцию. Опыт ремонта, восстановления и усиления несущих ЖБК с использованием ПКМ оказался вполне эффективным в современной отечественной и зарубежной практике.

1. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ, ПРИВОДЯЩИЕ К РАЗРУШЕНИЮ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Бетон — искусственный камневидный строительный материал, получаемый в результате формования и твердения рационально подобранной и уплотненной бетонной смеси, состоящей из минерального вяжущего, воды затворения, заполнителей и специальных добавок. Эксплуатационные свойства бетона определяются свойствами исходного вяжущего, крупного и мелкого заполнителей, их количественного соотношения, содержания воды затворения и соблюдения технологических условий производства, условий твердения и других факторов.

Разрушение ЖБК в большой степени происходит из-за нарушения сплошности бетона, которое возникает в результате различных видов коррозии: выщелачивания пресной водой, карбонизации, хлоридной, сульфатной и биологической коррозии. Причинами преждевременного коррозионного повреждения бетонных и железобетонных конструкций являются ошибки при проектировании и изготовлении конструкций: ошибочные оценки условий эксплуатации строительных конструкций (в полной мере не учтено агрессивное воздействие окружающей среды) и назначение состава бетона (его водо- и газопроницаемости, толщины защитного слоя), ошибки в технологии производства и многое другое. Скрытые дефекты проектирования и изготовления строительных конструкций обнаруживаются в процессе их длительной эксплуатации. Они проявляются в виде уменьшения прочности и растрескивания бетона, образования трещин и разрушения защитного слоя бетона, коррозии арматуры, что приводит к снижению несущей способности и качества строительных конструкций, сокращению сроков их эксплуатации.

Условия эксплуатации являются одним из определяющих факторов в возможном разрушении бетонных и ЖБ конструкций. Статистические данные показывают, что, например, разрушение железобетонных канализационных коллекторов в примерно 70 % случаев обусловлено коррозионными процессами из-за воздействия серной кислоты, которую продуцируют аэробные бактерии. Ее концентрация может достигать 7 %, что приводит к быстрому снижению эксплуатационного ресурса указанных коллекторов.

Коррозию бетона вызывает и агрессивное воздействие окружающей среды на составные части цементного камня, главным образом на $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Основными причинами коррозии являются:

- разложение составляющих цементного камня, растворение и вымывание из бетона гидроксида кальция;
- образование легкорастворимых солей в результате взаимодействия $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и других составных частей цементного камня с агрессивными соединениями и вымывание этих солей из бетона;
- образование в порах и микротрещинах бетона новых соединений, занимающих в результате перекристаллизации больший объем, чем исходные продукты гидратации цемента, что вызывает появление внутренних напряжений в бетоне и его растрескивание.

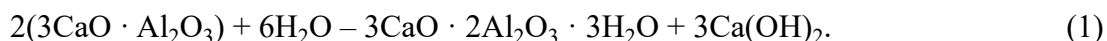
В соответствии с теорией коррозии бетонов, разработанной В.М. Москвиным, все физико-химические процессы коррозии бетона делят на три вида.

Коррозия первого вида (коррозия выщелачивания).

Выщелачивание бетона состоит в растворении и выносе компонентов цементного камня из структуры бетона, делая ее пористой и менее прочной. Характерным примером такой коррозии является растворение гидроксида кальция и вынос его из бетона при фильтрации вод с малой жесткостью (воды оборотного водоснабжения, конденсат, дождевые воды). При выносе до 20 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$ от его общей концентрации бетон теряет 25–30 % первоначальной прочности. По данным НИИЖБ, в условиях коррозии I вида глубина коррозии бетона за 50 лет составляет несколько миллиметров.

Процесс коррозии бетона протекает на поверхности раздела фаз или в непосредственной близости от нее. В этом случае скорость коррозии определяется скоростью процесса диф-

фузии агрессивных компонентов среды вглубь цементного камня или диффузией гидроксида кальция к поверхностному слою. В результате этого состав внутреннего и внешнего слоев бетона различаются между собой. Это приводит к возникновению процессов выравнивая состава всей фазы. При отсутствии дополнительных внешних факторов (например, перемешивания или давления воды), процесс протекает медленно, а равновесие может быть достигнуто довольно быстро на поверхности раздела фаз. Если бетонное сооружение находится в контакте с водой, то скорость коррозионных процессов будет определяться скоростью диффузии $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из глубины бетона к его наружной поверхности, контактирующей с водой, составом и концентрацией действующей агрессивной среды, степенью напора воды. В качестве примера рассмотрим коррозию цементного камня. Портландцемент состоит из четырех основных клинкерных минералов: трехкальциевый силикат (алит), двухкальциевый силикат (белит), трехкальциевый алюминат и четырехкальциевый алюмоферрит. При затворении цемента водой происходит его твердение и образуются новые гидратные соединения, практически нерастворимые в воде. Процесс гидролиза цемента можно представить в упрощенном виде:



Образующийся гидроксид кальция контактирует с водой и начинает частично растворяться, в первую очередь из поверхностного слоя бетона.

Уменьшение концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ приводит к гидролизу гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. На поверхности бетона при этом образуется слой продуктов коррозии цементного камня. Если он длительное время сохраняется на поверхности бетонных конструкций, например на фундаментах, находящихся в грунте, или в резервуарах, работающих при постоянном заполнении водой, скорость коррозии со временем быстро падает из-за роста диффузионного сопротивления слоя образовавшихся продуктов. При медленной фильтрации, когда скорость поступления воды мала, образуется пересыщенный раствор гидроксида кальция. Из этого раствора $\text{Ca}(\text{OH})_2$ выпадает в осадок, заполняя поры бетона, тем самым упрочняя его. Скорость коррозии замедляется еще и потому, что продукты коррозии препятствуют дальнейшей диффузии $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из цементного камня. При удалении продуктов коррозии с поверхности бетонных конструкций, например при большой скорости движения воды или при механическом действии насосов, скорость процесса может быть постоянной.

Наиболее опасно растворение и вынос гидроксида кальция для тонкостенных бетонных и железобетонных конструкций при напорном действии воды. При постоянной фильтрации воды из бетона $\text{Ca}(\text{OH})_2$ будет выноситься в количестве, пропорциональном количеству профильтровавшейся воды и средней концентрации гидроксида в этой воде. Натурные обследования опор мостов на севере России, плотин гидроэлектростанций в Восточной Сибири, водопроводных станций в Москве, эксплуатирующихся в чистых холодных водах, обладающих высокой выщелачивающей способностью, показали, что после их эксплуатации в течении 10–60 лет при отсутствии сквозной фильтрации и воздействия отрицательных температур повреждение плотного бетона от коррозии I вида ограничено небольшой глубиной. В конструкциях, возведенных в 30-х гг. прошлого века из бетона марок 100 и 140, глубина коррозии после 60 лет эксплуатации достигала 10 мм. За это время защитный слой бетона толщиной 10 мм полностью исчерпал свои защитные свойства.

При наличии сквозной фильтрации скорость коррозии бетона возрастает на порядки. Количество извести, вынесенной из массивных бетонных гидротехнических сооружений через фильтрующие трещины, может измеряться десятками килограммов. В фильтрующих трещинах наблюдается интенсивная коррозия стальной арматуры, вплоть до обрыва стержней.

Повышение стойкости строительных конструкций может быть достигнуто применением бетонов с низкой водопроницаемостью, исключением сквозных протечек через бетон. При ремонте поврежденных конструкций задача сводится к расшивке и заделке трещин или нагнетанию в трещины высокоподвижных ремонтных составов, очистке и восстановлению поверх-

ностных слоев бетона. При воздействии отрицательных температур ремонтные смеси должны содержать в своем составе воздухововлекающие или микрогазообразующие добавки и обеспечивать высокую адгезию к бетону, иметь минимальную усадку и способствовать получению бетона по водонепроницаемости марок W6–W8 и более.

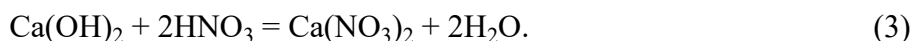
Коррозия второго вида.

Процессы коррозионного разрушения бетона связаны с химическим взаимодействием цементного камня с водными растворами агрессивных соединений. В результате образуются растворимые продукты, выносимые из бетона во внешнюю среду, или аморфные вещества, не обладающие вяжущими свойствами и не способные препятствовать дальнейшему развитию коррозии. Как правило, такие явления наблюдаются в кислых средах и протекают они гораздо интенсивнее, чем коррозия выщелачивания. К коррозии второго вида относятся *общекислотная* и *магnezиальная коррозия*, коррозия под действием органических веществ и минеральных удобрений.

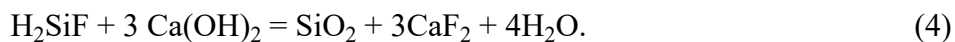
Газообразные вещества, которые при растворении в воде образуют минеральные кислоты, увеличивают коррозию бетонных и железобетонных конструкций, так как происходит снижение показателя pH цементного камня, а образующиеся растворимые соединения постепенно вымываются из бетона водой. К таким веществам относятся углекислый газ и оксид углерода: при растворении CO_2 в воде образуется слабая двухосновная угольная кислота (углекислотная коррозия). Оксид углерода (IV) и угольная кислота образуют свободную углекислоту. При ее длительном воздействии в поверхностном слое бетона происходит разрушение карбонатной пленки вследствие образования хорошо растворимого гидрокарбоната кальция. Кислотная коррозия бетона связана с взаимодействием $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с кислотами (реакция нейтрализации). Скорость коррозии определяется, прежде всего, продуктами реакций. Если в результате химических реакций образуются растворимые соли, то скорость коррозии возрастает. Например, в результате взаимодействия $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с уксусной кислотой образуется растворимый ацетат кальция, который легко вымывается из бетона:



Взаимодействие $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с азотной кислотой сопровождается образованием растворимого нитрата кальция:

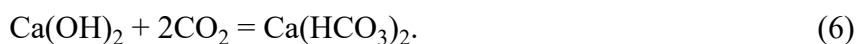
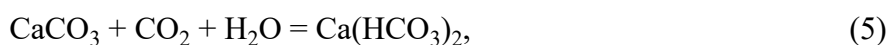


Если в результате химических реакций образуются труднорастворимые соли, выпадающие в осадок в порах цементного камня, то они создают препятствия для развития коррозионного процесса:



Образующиеся фторид кальция и оксид кремния — труднорастворимые соединения, способствующие замедлению коррозии цементного камня.

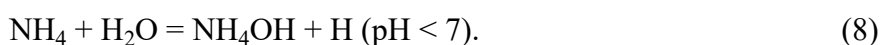
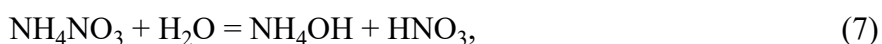
Углекислотная коррозия. Вода, содержащая избыточное количество свободной углекислоты, является агрессивной углекислотой, которая, реагируя с карбонатом и гидроксидом кальция бетона, превращает их в растворимые гидрокарбонаты, что приводит к быстрому разрушению бетонных конструкций. Химические реакции, протекающие при разрушении бетона, можно представить следующими уравнениями:



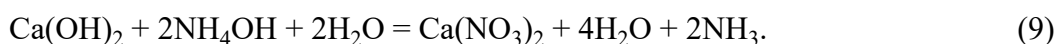
Нерастворимый карбонат кальция переходит в растворимый гидрокарбонат кальция.

Действие органических веществ. Органические вещества природных вод в основном представлены гуминовыми и гумусовыми кислотами и их солями. Они образуются при разложении отмерших растений или при окислении углей и других продуктов органического происхождения и представляют собой слабые электролиты, образующие малорастворимые соли кальция. Влияние таких природных вод на коррозионные процессы в бетонах незначительное. Так, например, плотные бетоны гарантируют достаточную стойкость железобетонных сооружений в болотных водах. Органические соединения, содержащие кислоты жирного ряда (льняное и хлопковое масла, рыбий жир и т.п.) и продукты, содержащие фенол, могут увеличить скорость коррозионных процессов.

Коррозия под действием солей. Для данного вида коррозии характерны обменные реакции. Скорость коррозии зависит как от состава этих солей, так и от состава продуктов их взаимодействия. Например, в сточных водах может быть довольно высокое содержание аммонийных солей, имеющих кислую реакцию среды при гидролизе:

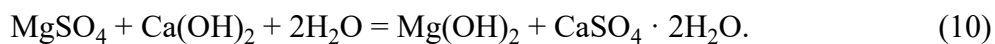


При взаимодействии гидроксида кальция с этими солями образуются растворимые соли, которые вымываются из бетона:

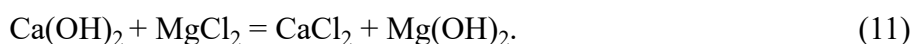


Следует отметить, что не всегда соли вступают в обменные реакции с компонентами цементного камня (хлориды натрия и кальция). В присутствии хлорида калия (натрия), за счет их большой гигроскопичности, возрастает растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что приводит к ускорению коррозии.

Магнезиальная коррозия. В результате взаимодействия солей магния с компонентами цементного камня образуется практически нерастворимый гидроксид магния:



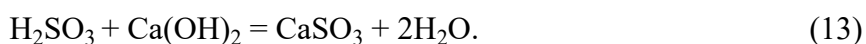
Образующийся гидроксид магния представляет собой белую рыхлую массу, которая накапливается в порах, трещинах и дефектах бетона, понижая его прочность. Аналогично протекают процессы и с другими растворимыми солями магния:



$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и CaCl_2 достаточно хорошо растворяются в воде, вымываются и уносятся фильтрующей водой. Действие газообразных веществ на процессы коррозии бетона зависят от природы и химической активности этих веществ. Такие газы, как азот и кислород, не являются агрессивными по отношению к бетону. Газы, которые при растворении в воде образуют кислоты, увеличивают скорость коррозии бетона, так как происходит понижение уровня pH цементного камня, а образующиеся растворимые соединения постепенно вымываются. При растворении оксида серы (IV) в воде образуется слабая двухосновная сернистая кислота:

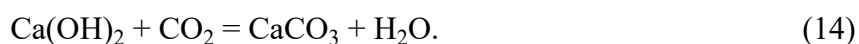


которая вступает во взаимодействие с гидроксидом кальция:



Сульфит кальция — малорастворимое соединение. Однако для сернистой кислоты и ее солей характерны реакции диспропорционирования, в результате которых образуются сульфаты. В этом случае начинается сульфатная коррозия (коррозия третьего вида).

Неоднозначно действие и углекислого газа (его содержание в воздухе составляет $\approx 0,03\%$). При его растворении в воде образуется слабая двухосновная угольная кислота. Оксид углерода (IV) и угольная кислота образуют свободную углекислоту. При длительном действии этой формы углекислоты в поверхностном слое бетона протекает следующий процесс:



Образующийся карбонат кальция практически нерастворим в воде и за счет этого происходит рост плотности поверхностного слоя бетона. Этот процесс называется *карбонизацией*. Карбонизация может способствовать упрочнению бетона низкой плотности.

Интенсивность процесса карбонизации зависит от плотности бетона, температуры, влажности и расположения бетонной поверхности в конструкции, других факторов. В сжатых элементах процессы карбонизации протекают медленнее, чем в растянутых. Значительно медленнее карбонизация протекает в плотных бетонах. С наветренной стороны железобетонного элемента процесс карбонизации протекает более интенсивно, так как происходит высушивание пор, что обеспечивает доступ CO_2 воздуха на большую глубину (разница глубины карбонизации может достигать 3–7 раз). Обычно глубина карбонизации бетона составляет до 10 мм за первые 10 лет и до 20 мм в течение 30 лет.

Карбонизированный слой бетона имеет более высокую прочность и плотность по сравнению с некарбонизированным бетоном. По этой причине в гидротехнических сооружениях для повышения плотности поверхностных слоев бетона прибегают к искусственной карбонизации. Однако в процессе карбонизации снижается показатель pH среды (с 12,5–13,1 до 8–9), что уменьшает естественные защитные свойства бетона и вызывает коррозию арматуры. Коррозия стальной арматуры вызывает растрескивание защитного слоя и значительное уменьшение несущей способности ЖБК.

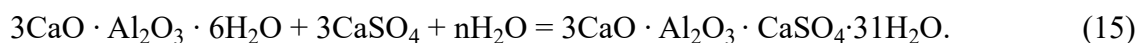
Из практики обследования состояния ЖБК известно много случаев повреждения конструкций из-за полной карбонизации защитного слоя бетона. Как правило, причиной этого является недостаточная толщина защитного слоя или высокая проницаемость бетона. Скорость карбонизации бетона определяется скоростью диффузии CO_2 в бетоне и находится в прямой зависимости от диффузионной проницаемости бетона для CO_2 . При достижении фронта карбонизации поверхности арматуры сталь начинает корродировать, что приводит к разрушению защитного слоя бетона. Вследствие уплотнения карбонатом кальция наружного слоя бетона особо низкой проницаемости процесс карбонизации бетонов прекращается, а толщина карбонизированного слоя составляет 1–3 мм и не влияет на коррозионное состояние стальной арматуры. Допускаемая максимальная величина диффузионной проницаемости бетона зависит от концентрации CO_2 в воздухе, проектных сроков эксплуатации конструкции и толщины защитного слоя бетона.

При своевременном обнаружении карбонизации защитного слоя бетона, не достигшей поверхности арматуры, возможна защита от коррозии бетона нанесением на поверхность конструкции плотного мелкозернистого бетона низкой диффузионной проницаемостью для CO_2 . В этом случае процесс карбонизации может быть остановлен, а в карбонизированном слое под цементно-песчаным покрытием, вследствие диффузии растворенного гидроксида кальция и щелочей, величина pH может восстановиться до первоначального значения, необходимого для пассивации стальной арматуры. Радикальным способом ремонта ЖБК при полной карбонизации бетона и развитии коррозии арматуры является удаление карбонизированного слоя бетона и продуктов коррозии стали с восстановлением защитного слоя новым бетоном, имеющим низкую газопроницаемость. Следует отметить, что в ЖБК во влажном воздухе может усилиться коррозия арматуры. Это связано с тем, что бетон теряет свои защитные свойства, если карбонизация схватывает весь защитный слой и распространяется до арматуры.

Коррозия третьего вида.

Этот вид коррозии связан с накоплением и действием новообразований в порах и капиллярах бетона. При заполнении таких пространств в толще бетона может возникнуть внутреннее напряжение, которое приведет к разрушению материала. Такими новообразованиями могут быть труднорастворимые вещества, выпадающие в осадок в результате химических реакций. Чаще всего такие процессы происходят при взаимодействии бетона с сульфатами.

Сульфатная коррозия. При взаимодействии гипса с трехкальциевым гидроалюминатом образуется труднорастворимый, обладающий большой гигроскопичностью, гидросульфалоюминат кальция, кристаллизующийся с большим увеличением (~ в 2,5 раза) объема твердой фазы:



Образующиеся кристаллы сначала уплотняют цементный камень, а затем, накапливаясь, приводят к его разрушению. Гидросульфалоюминат кальция называют «цементной бациллой», так как вслед за разрушением бетона происходит коррозия стальной арматуры и разрушение конструкции в целом.

Сульфатная коррозия строительных конструкций возникает в результате воздействия на бетон высокоминерализованных грунтовых вод, содержащих сульфаты. Она значительно усиливается, если конструкция подвержена систематическому попеременному увлажнению и высыханию. Для защиты бетона от воздействия сульфатной коррозии используют сульфатостойкий портландцемент с низким содержанием алюмината кальция или вводят в обычный цемент до 15 % горелой породы Кильдямского месторождения (Якутия), представляющей собой отходы угледобычи.

Щелочная коррозия. В цементном клинкере всегда присутствуют щелочные металлы, а в заполнителях могут присутствовать породы, содержащие аморфный кремнезем. В присутствии воды начинается процесс гидролиза, в результате которого образуются растворы NaOH и KOH. При обычных температурах между кремнеземом и растворами щелочей происходят химические реакции, в результате которых образуются аморфные силикаты кальция и натрия. В бетоне появляется сеть трещин, поверхность вспучивается и шелушится. Поэтому при наличии в заполнителе различных форм реакционноспособного кремнезема необходимо применять цемент с содержанием щелочей не более 0,65 % (в пересчете на Na₂O и K₂O).

Рассматривая процессы коррозии цемента, необходимо учитывать, что снижение прочности бетона может происходить и при многократном попеременном замораживании и оттаивании в воде. Этот вид разрушения называется морозным разрушением. Он связан с гидравлическим давлением воды, отжимаемой из пор и капилляров, в которых образуется лед. В бетоне с хорошо сформированной структурой, где резервные поры распределены равномерно, морозное разрушение практически не происходит.

Известно большое число повреждений бетонных и железобетонных конструкций, вызванных воздействием на бетон хлоридов, содержащихся в составе противогололедных реагентов. Причиной повреждения таких конструкций является проникание в бетон хлоридов, коррозия защитного слоя бетона и развитие коррозии арматуры. Коэффициент диффузии хлоридов в бетоне с В/Ц ~0,4 равен $(1-5) \cdot 10^{-8}$ см²/с. Высокопрочные бетоны, применяемые при строительстве морских платформ, имеют коэффициент диффузии порядка $1 \cdot 10^{-9}$ см²/с. Значения коэффициентов диффузии хлоридов в бетонных образцах, изготовленных с применением карбонатных заполнителей и испытанных в течение одного года в растворе хлорида натрия концентрации 17,55 %, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения коэффициентов диффузии хлоридов в бетонных образцах

В/Ц	0,5	0,41	0,36	0,24
Коэффициент диффузии, см ² /с	$15,5 \cdot 10^{-8}$	$11,5 \cdot 10^{-8}$	$5,6 \cdot 10^{-8}$	$2,74 \cdot 10^{-8}$

Из приведенных в таблице данных следует, что снижение В/Ц с 0,5 до 0,24 уменьшает на порядок коэффициент диффузии хлоридов в бетоне.

Диффузионная проницаемость бетона для хлоридов сильно зависит от состава цемента. Она ниже в бетонах на шлакопортландцементе и цементах с минеральными добавками, содержащими аморфный кремнезем, в том числе природную пуццолановую добавку или золу от сжигания каменного угля.

Экспериментально установлено, что значительное снижение диффузионной проницаемости бетона для хлоридов достигается совместным использованием суперпластификаторов различной химической основы и содержащих аморфный кремнезем добавок — микрокремнезема, золы уноса, доменные шлаков. Это обусловлено формированием плотной структуры бетона при одновременном снижении водоцементного отношения. Если обычные бетоны имеют коэффициент диффузии хлоридов $5 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$, то бетоны с суперпластификатором на основе нафталинформальдегида (СП-1) и микрокремнезема — $(1-5) \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$, т.е. на порядок ниже, чем традиционные бетоны. Диффузионная проницаемость бетона с органоминеральной добавкой МБ-01 ($1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$), состоящей также из микрокремнезема и суперпластификатора, примерно на порядок ниже, чем бетона на портландцементе. Благодаря низкой диффузионной проницаемости такие бетоны могут долго сохранять стальную арматуру в бетоне в пассивном состоянии в агрессивных хлорсодержащих средах. Совместное использование суперпластификаторов различной химической основы и содержащих аморфный кремнезем добавок обеспечивают в ряде случаев более эффективную защиту от воздействия хлоридов на стальную арматуру в ЖБ конструкциях, по сравнению с применением добавок-ингибиторов коррозии.

Бетоны на портландцементе утрачивают пассивирующее действие на стальную арматуру при концентрациях хлоридов 0,5–2,0 % от массы цемента, а у бетонов, содержащих ингибиторы коррозии, критическая концентрация хлоридов увеличивается примерно в два раза. Поэтому для защиты стальной арматуры ЖБК в хлорсодержащих средах используют бетоны с комплексными добавками, содержащими ингибиторы коррозии и компоненты, эффективно понижающие проницаемость бетона.

Биологическая коррозия — повреждение бетона продуктами жизнедеятельности живых организмов (бактерий и грибов), поселяющихся на поверхности ЖБК. По масштабам повреждения ЖБК наибольший ущерб вызывают тионовые бактерии. Известны массовые повреждения канализационных сооружений, связанные с разрушением бетона серной кислотой, выделяемой тионовыми бактериями. Концентрация сероводорода в канализационных коллекторах достигает сотен миллиграммов на кубометр воздуха, а концентрация биогенной серной кислоты 5–20 %, при этом рН влаги на поверхности конструкций составляет 1–2. В этих условиях бетон может разрушаться (превращаться в сыпучую несвязанную массу) со скоростью 2–3 см/год.

Повреждения бетонных и железобетонных конструкций, вызванные воздействием биологически активных сред, в соответствии с СП 28.13330.2012 подразделяют на четыре степени:

I степень — поверхностный плесневый налет без видимого разрушения;

II степень — поверхностное разрушение бетона на глубину до 2 см без обнажения арматуры;

III степень — шелушение и выкрашивание бетона из ЖБК, отслоение защитного слоя бетона от арматуры железобетона;

IV степень — биоповреждению II и III степени подвержено более 50–60 % конструкций.

Наиболее часто грибковые образования и плесень образуются в местах переувлажнения ЖБК и с недостаточным воздухообменом. Поэтому при эксплуатации подземных сооружений применяют меры для снижения влажности воздуха внутри сооружения, исключают конденсацию и капиллярный подсос влаги, проводят обработку поверхности конструкций биоцидными материалами, подавляющими жизнедеятельность тионовых бактерий.

Таким образом, долговечность бетонных и железобетонных конструкций зависит от их свойств и агрессивности окружающей среды. При оценке самопроизвольности коррозионного разрушения необходимо знать составные части бетона и химический состав окружающей среды. Для этого следует представить уравнения всех предполагаемых и протекающих реакций в изучаемой термодинамической системе, рассчитать свободную энергию Гиббса и константы равновесия. В том случае, если константа равновесия очень мала, т.е. реакция не осуществляется до конца, то этим процессом можно пренебречь.

Долговечность строительных конструкций в значительной степени обеспечивается применением бетонов низкой водопроницаемости. Массоперенос веществ в теле бетона строительных конструкций, работающих в безнапорном режиме, осуществляется путем фильтрации жидкости или газа при наличии градиента давления, капиллярного переноса при наличии градиента влажности и/или диффузии веществ при наличии разности концентраций. Согласно современным представлениям, капиллярное поднятие воды наблюдается в капиллярах радиусом 1–1000 мкм. Экспериментально установлено, что снижение водоцементного отношения с получением бетонов марок по водонепроницаемости W12–W14 делает капиллярный перенос малозначительным, а бетон в условиях капиллярного всасывания и воздействия солей — коррозионностойким. При этом капиллярно-конденсированная вода в цементном камне не перемещается по механизму капиллярного переноса. Фильтрация и капиллярный перенос воды через бетон уменьшается при $V/C < 0,4$.

Если процессы фильтрации воды можно значительно замедлить за счет снижения водоцементного отношения, то скорость диффузии растворенных веществ (например, хлоридов) в меньшей степени зависит от V/C . Диффузионная проницаемость резко снижается при низком v/c , только когда в структуре бетона начинают преобладать микропоры. В бетонах с расходом цемента от 350 до 500 кг/м³ при снижении V/C с 0,5 до 0,25 общая пористость уменьшается в 4 раза. При $V/C < 0,4$ процесс карбонизации бетона в большинстве случаев становится малозначительным. Преобладающие при низких V/C поры размером 1,5–5 нм, количество которых в таких бетонах составляет около 70 %, непроницаемы для фильтрующей воды и имеют низкую диффузионную проницаемость. Подобный эффект наблюдается при введении в состав бетона эффективных водоредуцирующих добавок — суперпластификаторов. В тонких слоях вода имеет низкую диэлектрическую проницаемость и электропроводность, повышенную плотность и вязкость, обладает пониженной растворяющей способностью. Эти факторы замедляют диффузию растворенных солей в микропорах бетона.

При равной общей пористости цементного камня увеличение доли микропор снижает диффузионную проницаемость материала. В капиллярно-конденсирующей влагу порах радиусом до 100 нм стенки пор оказывают влияние на диффузионное перемещение ионов. Количество пор радиусом более 10 нм существенно снижается при $V/C < 0,3$, а цементный камень обладает повышенным диффузионным сопротивлением. На диффузию ионов оказывают влияние знак и величина поверхности микрокапилляров, которые зависят от состава твердых фаз цементного камня, вида и концентрации химических добавок — электролитов и ПАВ. Отмечается запирающее действие двойного электрического слоя для отрицательно заряженных ионов хлоридов и сульфатов. Используя добавки, содержащие аморфный кремнезем, и понижая водоцементное отношение за счет использования суперпластификаторов, можно получать бетоны весьма низкой диффузионной проницаемости, обладающие высокой коррозионной стойкостью. В бетонах с водонепроницаемостью W16 и более перенос вещества осуществляется почти полностью по механизму диффузии.

Таким образом, установление основных причин разрушения бетона в конструкциях зданий и сооружений позволит не только правильно подобрать ремонтный состав, но и наметить пути усовершенствования указанных составов.

2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ, ДЕФЕКТОВ И ТРЕЩИН БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Дефекты и повреждения в бетонных и железобетонных конструкциях возникают в процессе их изготовления, транспортировки, производства монтажных, бетонных работ и эксплуатации вследствие перегрузок, коррозионного воздействия окружающей среды, пожаров и других негативных факторов. Они могут также возникать в результате стихийных катаклизмов (землетрясений, наводнений и военных действий). К дефектам ЖБК относят повышенную пористость бетона, трещины, выбоины, сколы, каверны, обнажение арматуры, раковины, рабочие швы и разрывы, возникающие при бетонировании, а также поверхностное разрушение бетона. Своевременное обнаружение и ликвидация указанных дефектов и повреждений с целью восстановления исходной прочности бетона и целостности несущих ЖБК повысит их надежность и долговечность, снизит расходы на проведение капитального ремонта.

Повреждения и дефекты в эксплуатируемых бетонных и железобетонных конструкциях зданий и сооружений подразделяют по характеру их влияния на несущую способность на три группы:

I группа — повреждения, практически не снижающие прочность и долговечность строительных конструкций (сколы бетона без оголения арматуры, поверхностные раковины, пустоты и трещины, в том числе усадочные, с раскрытием менее 0,2 мм, а также трещины, у которых под воздействием временной нагрузки и температуры ширина раскрытия увеличивается не более чем на 0,1 мм);

II группа — повреждения, снижающие долговечность строительных конструкций (коррозионно-опасные трещины с раскрытием более 0,2 мм и трещины с раскрытием более 0,1 мм в зоне рабочей арматуры предварительно напряженных пролетных строений, в том числе и вдоль пучков арматуры под постоянной нагрузкой, а также трещины с раскрытием более 0,3 мм под временной нагрузкой, пустоты, раковины и сколы с оголением арматуры);

III группа — повреждения, снижающие несущую способность строительных конструкций (трещины, не предусмотренные расчетом по прочности и выносливости, наклонные трещины в стенках балок, горизонтальные трещины в сопряжениях плит перекрытия и пролетных строений, большие раковины и пустоты в бетоне сжатой зоны и т.п.).

Повреждения I группы не требуют принятия срочных мер, их устраняют в профилактических целях за счет нанесения различных защитных покрытий. Основное назначение защитных покрытий при повреждениях I группы — остановить развитие имеющихся мелких трещин, предотвратить образование новых, улучшить защитные свойства бетона и предохранить конструкции от атмосферной и химической коррозии. При повреждениях II группы ремонт обеспечивает повышение долговечности зданий и сооружений. При этом обязательной заделке подлежат трещины в зоне расположения пучков преднапряженной арматуры и трещины, расположенные вдоль арматуры. При повреждениях III группы восстанавливают несущую способность строительных конструкций по конкретному признаку, а применяемые ремонтные материалы должны обеспечить требуемые прочностные характеристики и долговечность конструкции.

Основные причины возникновения дефектов и повреждений в ЖБК (табл. 2.1):

– механические воздействия (ударные нагрузки, перегрузки и деформации, вызванные осадкой, вибрацией или сейсмическим воздействием);

– химические и биологические воздействия окружающей среды (воздействие сульфатов, взаимодействие между щелочными составляющими вяжущего и минеральными заполнителями бетона);

– физические воздействия (циклы замораживания и оттаивания, трещинообразование от температурных напряжений, повреждения при пожаре, миграция влаги и кристаллизация солей, эрозия).

Повреждения в строительных конструкциях в зависимости от причин их возникновения делятся на две группы: от силовых воздействий и от воздействия внешней среды. Последняя группа повреждений не только снижает прочность ЖБК, но и уменьшает их долговечность.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru