В. Ф. СТЕПАНОВА

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА



«Инфра-Инженерия»

УДК 691.32
ББК 38.626.1
С79

Рецензенты:
доктор технических наук, академик РААСН, дважды лауреат премии Правительства РФ, почетный строитель г. Москвы, заведующий лабораторией химических добавок и модифицированных бетонов НИИЖБ А. А. Гвоздева АО «НИЦ „Строительство” *Каприелов Семен Суренович*;
кандидат технических наук, заместитель директора НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ „Строительство” по производственной работе, заместитель заведующего лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций *Бучкин Андрей Викторович*

Степанова, В. Ф.

С79 Долговечность бетона : учебное пособие / В. Ф. Степанова. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 124 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-1366-4

Приведена теория коррозии бетона и металла, рассматривается правильный подход к выбору строительных материалов, приготовлению бетона и железобетона, обеспечивающих требуемую долговечность конструкций. Даны основные признаки коррозии бетона в жидких агрессивных средах, механизм коррозии арматуры. Показаны способы повышения коррозионной стойкости бетона и обеспечения сохранности арматуры на стадии проектирования состава бетона в процессе приготовления и эксплуатации конструкций. Приведены математические модели коррозии бетона, позволяющие совершенствовать технологию получения бетонов повышенной долговечности.

Для студентов, обучающихся по направлению «Строительство».

УДК 691.32
ББК 38.626.1

ISBN 978-5-9729-1366-4

© Степанова В. Ф., 2023
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ 6

1.1. Прогнозирование глубины разрушения бетона при коррозии 16
1.2. Коррозия арматуры в бетоне 27
1.3. Коррозия высокопрочных арматурных сталей 46

2. МЕТОДЫ ПЕРВИЧНОЙ И ВТОРИЧНОЙ ЗАЩИТЫ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА 51

2.1. Первичная защита как основа обеспечения долговечности бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред 51
2.2. Методы вторичной защиты бетонных и железобетонных конструкций от коррозии 58

3. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА 72

3.1. Основные указания к организации учебно-исследовательских работ 72
3.2. Хранение и подготовка материалов 72
3.3. Аппаратура, оборудование, приспособления 73

4. ОБЩИЕ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ 78

4.1. Приготовление бетонных (растворных) смесей 78
4.2. Определение удобоукладываемости бетонной смеси 78
4.3. Корректирование удобоукладываемости бетонной смеси 81
4.4. Определение консистенции и подвижности растворной смеси 82
4.5. Определение плотности бетонной смеси 82
4.6. Изготовление образцов 83
4.7. Твердение образцов 84
4.8. Определение плотности бетона 85
4.9. Испытание образцов 86
4.10. Определение фактического расхода составляющих материалов на 1 м^3 бетона, коэффициента выхода бетонной смеси и расхода материалов на замес бетономешалки 87
4.11. Расчет прочности бетона во времени 88

5. ЛАБОРАТОРНЫЕ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ 89

Учебно-исследовательская работа № 1. Определение «истинного» водоцементного отношения в легких бетонах 89

Учебно-исследовательская работа № 2. Определение водопоглощения бетонов (растворов) 91
Учебно-исследовательская работа № 3. Определение водонепроницаемости по «мокрому пятну» 93
Учебно-исследовательская работа № 4. Определение водонепроницаемости по коэффициенту фильтрации 95
Учебно-исследовательская работа № 5. Определение диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа 98
Учебно-исследовательская работа № 6. Определение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре (электрохимический метод испытаний) 105
Учебно-исследовательская работа № 7. Определение сравнительной коррозионной стойкости бетонов и строительных растворов на основе минеральных гидравлических вяжущих различного минералогического и вещественного состава, различного вида и количества химических добавок и прогнозирование долговечности бетона в агрессивных средах 113
ЛИТЕРАТУРА 120

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Бетон давно получил широкое распространение в строительстве различных зданий и сооружений. Широкое применение бетона в строительстве обусловлено теми большими возможностями, которые предоставляет этот материал строителю.

Применяя различные цементы и устанавливая величину водоцементного отношения, можно получать в широких пределах желаемую прочность бетона; соответствующим выбором заполнителей и их состава достигается изменение его средней плотности (объемной массы). Подбирая цементы, заполнители, химические и минеральные добавки, можно получать бетоны различной стойкости и долговечности в любых условиях эксплуатации, включая воздействие агрессивных сред.

По степени воздействия на строительные конструкции среды разделяют на неагрессивные, слабоагрессивные, среднеагрессивные, сильноагрессивные.

По физическому состоянию среды разделяют на газообразные, твердые и жидкие.

При проектировании бетонных и железобетонных конструкций, предназначенных для эксплуатации в агрессивной среде, их коррозионную стойкость следует обеспечивать применением мер первичной защиты: снижением проницаемости бетона технологическими приемами, применением коррозионностойких материалов, добавок, повышающих коррозионную стойкость бетона и его защитную способность по отношению к стальной арматуре, установлением требований к категориям трещиностойкости, ширине расчетного раскрытия трещин, толщине защитного слоя бетона.

В случае недостаточной эффективности названных выше мер должна быть предусмотрена вторичная защита поверхности конструкции:

- лакокрасочными толстослойными покрытиями;
- комбинированными и пропиточно-кольматирующими системами покрытий как на цементно-полимерной, так и на полимерной основе.

При проектировании бетонных и железобетонных конструкций, предназначенных для эксплуатации в агрессивной среде, важной характеристикой для бетона является его проницаемость, она в известной мере определяет способность материала сопротивляться воздействию увлажнения и замерзания, влиянию различных атмосферных факторов и агрессивных сред.

В соответствии с ГОСТ 31384 и СП 28.13330, бетоны по показателям проницаемости разделены на бетоны нормальной, пониженной и особо низкой

проницаемости. В зависимости от степени агрессивности среды, проницаемость бетона характеризуют прямыми показателями (маркой бетона по водонепроницаемости, коэффициентом фильтрации, диффузионной проницаемостью газа) и косвенными показателями (водопоглощением бетона и водоцементным отношением), которые должны использовать при подборе состава бетона (таблица 1).

Таблица 1

Показатели проницаемости бетона

Характеристика бетона	Категория проницаемости бетона				
	Нормальная	Пониженная	Низкая	Особо низкая	
Марка бетона по водонепроницаемости	W4	W6	W8	W10-W14	W16-W20
Коэффициент фильтрации, см/с	Св. $2\cdot10^{-9}$ до $7\cdot10^{-9}$	Св. $6\cdot10^{-10}$ до $2\cdot10^{-9}$	Св. $1\cdot10^{-10}$ до $6\cdot10^{-10}$	Св. $5\cdot10^{-11}$ до $1\cdot10^{-10}$	Менее $5\cdot10^{-11}$
Коэффициент диффузии для хлоридов, $см^2/с$	–	Менее $5\cdot10^{-8}$ до $1\cdot10^{-8}$		Менее $1\cdot10^{-8}$ до $5\cdot10^{-9}$	Менее $5\cdot10^{-9}$
Водоцементное отношение, не более	0,6	0,55	0,45	0,35	0,30
Водопоглощение по массе, %	Св. 4,7 до 5,7	Св. 4,2 до 4,7	Св. 3,7 до 4,2	Св. 3,0 до 3,7	Менее 3,0

С методами оценки показателей проницаемости студенты ознакомятся при выполнении учебно-исследовательских работ № 1–4 (см. раздел 5).

Как указывалось выше, на бетонные и железобетонные конструкции, эксплуатируемые в промышленных, гражданских, жилых, сельскохозяйственных зданиях, гидротехнических, мелиоративных и ряде других сооружений, могут действовать агрессивные среды. Долговечность конструкции определяется стойкостью, как бетона, так и арматуры к воздействию на них агрессивной среды [1].

Степень агрессивного воздействия сред на бетонные и железобетонные конструкции определяется: для жидких сред – наличием и концентрацией агрессивных агентов, температурой, напором или скоростью движения жидкости у поверхности; газовых сред – видом и концентрацией газов, растворимостью их в воде, влажностью и температурой среды; твердых сред (соли, аэрозоли, пыли) – дисперсностью, растворимостью в воде, влажностью окружающей среды. Степень их агрессивного воздействия на бетон определяется в соответствии с требованиями ГОСТ 31384 и СП 28.13330.

При воздействии на бетон агрессивной среды может происходить его разрушение. Разрушение конструкции в данном случае наступает вследствие недостаточной стойкости бетона. При проектировании конструкции необходимо учитывать состав агрессивной среды, условия службы конструкции, правильно выбрать материалы и назначить плотность бетона, чтобы обеспечить заданную долговечность конструкции [1–5].

При проектировании железобетонных конструкций надо также уделять внимание сохранности арматуры в бетоне. При воздействии на бетон жидких сред, не содержащих агрессивных по отношению к стали ионов (Cl^-, SO_2^{2-} и др.), в первую очередь, как правило, разрушается бетон. В условиях газовоздушной среды (при повышении относительной влажности воздуха более 60 %), а также при воздействии на конструкцию жидких или твердых сред, содержащих агрессивные по отношению к стали ионы (например, Cl^-), возможно развитие коррозии арматуры. Разрушение железобетонной конструкции в данном случае может наступить вследствие коррозии арматуры. Продукты ржавчины накапливаются на арматуре, давят на бетон, вызывают появление трещин, а затем и отслоение защитного слоя. Наибольшую опасность вызывает применение высокопрочных арматурных сталей, подверженных коррозионному растрескиванию. В этом случае возможен внезапный хрупкий обрыв напряженной арматуры.

Коррозия бетона в газообразной среде протекает, как правило, при наличии влаги, и возникающие при этом процессы практически не отличаются от коррозии бетона в водной среде.

Москвиным В. М. [6] была предложена классификация основных видов коррозии. На основе полученных экспериментальных данных и накопленного опыта эксплуатации конструкций процессы, протекающие при коррозии бетона, были разделены на три основных вида.

В первую группу (коррозия I вида) объединены все те процессы коррозии, которые возникают в бетоне при действии мягких вод, когда составные части цементного камня растворяются и уносятся протекающей водой. Особое развитие коррозия I вида получает при фильтрации воды через бетон.

Ко второй группе (коррозия II вида) относятся те процессы коррозии, которые развиваются в бетоне при действии вод, содержащих химические вещества, вступающие в реакцию с составляющими цементного камня. Продукты реакции при этом легко растворяются и уносятся водой в виде аморфной массы, не обладающей вяжущими свойствами, либо остаются на месте реакции. Эта группа включает процессы, возникающие при действии кислот и магнезиальных солей.

В третью группу (коррозия III вида) входят те процессы коррозии, при развитии которых в порах и капиллярах бетона происходит накопление малорастворимых солей; причем их кристаллизация вызывает возникновение значительных напряжений в стенках пор и капилляров и приводит к разрушению структурных элементов бетона. Сюда могут быть отнесены процессы коррозии при действии сульфатов, когда разрушение бетона вызывается ростом кристаллов гидросульфоалюминатов кальция.

В естественных условиях обычно наблюдают воздействие на бетон ряда факторов, но обычно один из них является ведущим.

Коррозия I вида наиболее опасна в тонкостенных конструкциях и в конструкциях, работающих под напором воды, когда составные части цементного камня могут растворяться и вымываться водой. Наиболее легко растворимым продуктом гидратации цемента является гидрат окиси кальция, выщелачивание которого ведет к гидролизу цементного клинкера. В первую очередь, разрушаются многоосновные соединения типа трехкальциевого и двухкальциевого гидросиликатов, а затем уже низкоосновные соединения (например, $CaO \cdot SiO_2 \cdot aq$). Из гидроалюминатов менее стойким является четырехкальциевый алюмоферрит (C_4AF).

Выщелачивание гидроокиси кальция из бетона приводит к потере прочности растворной части бетона. При потере бетоном 33 % CaO наступает его разрушение. Скорость коррозии бетона прямо пропорциональна скорости течения воды, омывающей этот бетон, но до определенных пределов. При больших скоростях течения воды рост интенсивности выщелачивания уже больше зависит от скорости отвода CaO с поверхности бетона. Существенное влияние на протекание процессов коррозии I вида оказывает химический состав воды-среды. Присутствие в растворе солей, даже не вступающих в реакцию с элементами цементного камня, но повышающих ионную силу раствора, увеличивает выщелачивание CaO. Присутствие в растворе солей кальция ($CaHCO_3$, $CaCO_3$) снижает скорость выщелачивания, поэтому карбонизация бетона будет способствовать снижению скорости коррозии I вида.

Стойкость бетона против коррозии I вида зависит также от химического состава применяемых цементов. Преобладание в портландцементе высокоосновных соединений (алита C_3S, белита C_2S) понижает стойкость цементного камня в том случае, если разрушение идет за счет растворения его составных частей, т. е. в раствор переходит большое количество CaO.

Стойкость бетона может быть повышена путем введения в цемент активной гидравлической добавки (трепела, трасса и др.), которые способны связывать $Ca(OH)_2$ в нерастворимые соединения и уменьшать тем самым степень выщелачивания CaO. Кроме того, добавки снижают водонепроницаемость бе-

тона. Необходимо отметить, что пуццолановый портландцемент будет более стоек при коррозии I вида только в том случае, если исключено совместное действие мороза и воды.

Для повышения стойкости бетона при коррозии I вида используют:

- ***бетоны повышенной плотности;***
- ***естественную или искусственную карбонизацию поверхностного слоя бетона;***
- ***специальные цементы, в частности пуццолановые;***
- ***гидроизоляцию поверхности бетона;***
- ***облицовку или пропитку бетона и т. д.***

При коррозии II вида последовательность разрушения бетона отсутствует. В поверхностных слоях бетона, соприкасающихся с внешней средой, идет разрушение структурных элементов гидратированного цементного камня, а иногда и негидратированных зерен цементного клинкера. Новообразования не обладают вяжущими свойствами и достаточной плотностью, чтобы воспрепятствовать дальнейшему проникновению агрессивной среды. Они смываются, растворяются и обнажаются более глубокие слои бетона.

Наиболее часто встречается при действии природных вод коррозия бетона под действием углекислых вод. Углекислота H_2CO_3 присутствует, как правило, во всех водах. Источником обогащения воды углекислотой являются биохимические процессы, протекающие в воде и в почве.

Углекислота имеет две ступени диссоциации:

$$H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-,$$
$$HCO_3 \leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-},$$
$$H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow 2H^+ + CO_3^{2-}.$$

Увеличение в растворе ионов водорода (H^+) смещает равновесие реакции, при этом $HCO_3^- \rightarrow H_2CO_3$, а $CO_3^{2-} \rightarrow HCO_3^-$. Уменьшение ионов водорода приводит, наоборот, к образованию HCO и CO_3^{2-} из углекислоты. Для различных значений pH раствора характерны разные основные формы: при pH > 8,4 углекислота H_2CO_3 в воде отсутствует, при pH<6,5 H_2CO_3 – основная форма, при pH < 4 HCO_3^- отсутствует; при pH > 6,5 HCO_3^- – основная форма, при pH > 11 CO_3^{2-} – основная форма. Для устойчивого состояния HCO_3^- в растворе необходимо наличие некоторого количества CO_2. Вода, в которой H^+, CO_3^{2-} и HCO_3^- находятся в равновесном состоянии, не способна растворять карбонатную пленку, т. е. по отношению к цементному камню она не агрессивна. Увеличение CO_2 сверх равновесного создает условия для растворения карбонатной пленки, т. е. вода приобретает агрессивные свойства по отношению к цементному камню бетона.

Присутствие в растворе ионов (Cl^-, Na^+ и др.), не участвующих в реакции, увеличивает ионную силу раствора, ускоряет реакцию, способствуя растворению большого количества $CaHCO_3$. В случае если на бетон действует стоячая или медленно движущаяся вода, на поверхности бетона устанавливается карбонатное равновесие, т. е. разрушение замедляется. При быстром течении воды замедление реакции вызывается уменьшением реагирующих поверхностей, уменьшение ионов OH^- в растворе способствует переводу $CaHCO_3$ в $CaCO_3$, который выпадает в осадок. Чем выше концентрация OH^- внутри цементного камня, тем выше скорость его разрушения при быстром обмене агрессивной воды у поверхности.

Отсюда можно заключить, что вначале скорость разрушения цементного камня на портландцементе и пуццолановом портландцементе будет одинаковая, затем у цементного камня на пуццолановом цементе она значительно уменьшается, так как количество гидроксильных ионов (OH^-) в жидкой фазе в нем значительно меньше. По этой же причине более высокую стойкость к коррозии II вида будет иметь бетон на глиноземистом цементе. При этом существенную роль играет плотность бетона и продуктов коррозии. Необходимо отметить, что при углекислотной коррозии определяющим фактором является концентрация H_2CO_3 в растворе, т. е. чем больше агрессивной H_2CO_3, тем выше кислотные свойства раствора и скорость коррозии.

Действие на бетон неорганических кислот также вызывает в бетоне процессы коррозии II вида, которые могут переходить в коррозию I вида, вызывая полное разрушение цементного камня бетона:

$$Ca(OH)_2 + 2HCl\ (H_2SO_4,\ 2HNO_3 \text{ и др.}) \rightarrow CaCl_2\ [CaSO_4,\ Ca(NO_3)_2 \text{ и др.}] + 2H_2O;$$

$$nCaO \cdot mSiO_2 + HCl + aq = nCaCl_2 + mSi(OH)_4 + aq \text{ и т. д.}$$

В зависимости от вида кислоты в процессе реакции образуются различные соли. Скорость разрушения цементного камня будет зависеть от растворимости солей кальция. При большой растворимости продуктов реакции быстрее протекает разрушение цементного камня. Скорость коррозии в этом случае ограничивается реакционной емкостью агрессивной среды, скоростью ее обмена на поверхности бетона и размером поверхности соприкосновения среды и цементного камня. Если продукты реакции малорастворимы, то, оставаясь на месте реакции, т. е. на поверхности бетона, они закрывают доступ агрессивной среде к внутренним слоям цементного камня и замедляют скорость коррозии.

Существенную роль в развитии процесса коррозии бетона II вида играет скорость обмена раствора у поверхности цементного камня.

При малых скоростях обмена и малых концентрациях кислот (pH > 4) взаимодействие кислоты с гидроокисью кальция протекает полностью:

$$2HCl + Ca(OH)_2 = CaCl_2 + 2H_2O.$$

После этого раствор нейтрализуется, происходит растворение $Ca(OH)_2$, образуется $CaCO_3$ и далее процесс коррозии II вида сменяется процессом коррозии I вида.

При больших скоростях ограничивающим фактором скорости коррозии является размер поверхности соприкосновения агрессивного раствора и цементного камня и скорость притока агрессивной среды. Цементы по стойкости в кислотах малых концентраций можно расположить в следующем порядке: глиноземистый, пуццолановый, портландцемент, что аналогично коррозии I вида. Это связано с тем, что процесс коррозии II вида протекает вместе с процессом коррозии I вида, и последнему в этом случае принадлежит ведущая роль. При повышении концентрации кислот разница в стойкости цементов становится практически неощутимой. В этом случае стойким считается специальный кислотоупорный цемент.

К защитным мероприятиям для бетона в этом случае следует отнести выбор специального вяжущего и надежную изоляцию поверхности в виде покрасок, облицовок и т. д.

Ко второму виду коррозии бетона относят также действие магнезиальных солей на бетон. Соли магния $MgSO_4$ и $MgCl_2$, как правило, присутствуют в грунтовых водах. Большое количество этих солей содержится и в морской воде. При действии таких солей на бетон происходит взаимодействие с гидроксидом кальция – $Ca(OH)_2$:

$$MgSO_4 + Ca(OH)_2 = CaSO_4 + \underline{Mg(OH)_2\downarrow},$$

или

$$MgCl_2 + Ca(OH)_2 = CaCl_2 + \underline{Mg(OH)_2\downarrow}.$$

При малых концентрациях раствора $MgCl_2$ реакционная емкость раствора низкая. Реакции с $Ca(OH)_2$ протекают на поверхности бетона. Выделяющийся при этом $Mg(OH)_2$ образует на поверхности бетона пленку, которая даже способствует предохранению бетона от дальнейшего разрушения, т. е. при малых концентрациях растворов скорость диффузии $Ca(OH)_2$ из внутренних слоев бетона достаточна, чтобы восполнить то количество, которое ушло на реакцию с солями. При длительном взаимодействии с такими растворами во внутренних слоях бетона развивается коррозия I вида. При больших концентрациях $MgCl_2$ реакционная емкость раствора велика, количество $Ca(OH)_2$ недостаточно для нейтрализации, поэтому раствор диффундирует внутрь бетона.

При действии $MgSO_4$ на бетон «критическая» концентрация определяется соотношением между суммарной поверхностью воздействия цементного камня и количеством раствора. Если время соприкосновения раствора $MgSO_4$ с поверхностью цементного камня больше времени полного насыщения этого объема сульфатом кальция ($CaSO_4$), то гипс выпадает в осадок. В противном случае в твердой фазе будет образовываться $Mg(OH)_2$. Образование $CaSO_4$ – это уже процесс коррозии III вида, который будет рассмотрен ниже.

Так как взаимодействие магнезиальных солей с $Ca(OH)_2$ связано с его уносом и проникновением вглубь бетона солей, которые способны вызвать дальнейшее разрушение бетона, то цемент с большим запасом CaO более стоек в данных условиях.

Опыты показали, что при концентрации растворов солей до 5 % стойкость портландцемента и пуццоланового портландцемента практически одинакова, при дальнейшем увеличении концентрации наиболее стойки бетоны на портландцементе. Высокой стойкостью обладают также цементы, в которых отсутствует $Ca(OH)_2$, вступающий в обменные реакции с солями магния, например, глиноземистый цемент.

Для защиты бетона от коррозии II вида используют следующие приемы:

- ***правильный выбор цемента;***
- ***снижение проницаемости бетона;***
- ***защита поверхности бетона специальными красками, облицовкой;***
- ***другие защитные мероприятия.***

Коррозия III вида характеризуется образованием в порах и капиллярах бетона малорастворимых солей, вызывающих значительные напряжения, способствующие разрушению структуры бетона. Такими продуктами, образующимися при воздействии сульфатов на бетон, являются гипс и гидросульфоалюминат кальция, встречающийся в двух модификациях:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4(30 \div 32)H_2O$$

и

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4(8 \div 12)H_2O.$$

При коррозии III вида в начальных стадиях идет уплотнение бетона за счет кристаллических новообразований солей. В плотном бетоне пополнение солей идет медленнее, процесс коррозии можно распознать иногда, через несколько лет. В пористом бетоне процесс протекает интенсивнее, и через несколько недель или месяцев проявляется в полную силу.