

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Прогнозирование долговечности железобетона

При оценке степени агрессивности среды по отношению к железобетонным конструкциям, как в СНиП 2.03.11-85 [1], так и в EN 206 принят средний срок службы конструкций 50 лет. Когда стоит задача обеспечить более длительный срок безотказной работы конструкции в различных условиях эксплуатации, для оценки долговечности прибегают к известным аналитическим закономерностям деградации защитного слоя бетона (например, 1-м закон Фика, уравнение Таманна и др.).

В концепции расчета железобетонных конструкций минимальные значения толщины защитного слоя установлены из предположения защитного действия на арматуру щелочной среды бетона во все время жизни конструкции. Исходят из того, что это обеспечивается назначением защитного слоя определенной толщины и плотности. При этом считается, что трещины, которые неизбежно появляются в железобетонных элементах при обычной толщине защитного слоя и имеют ширину раскрытия 0,15...0,3 мм, при достаточном качестве защитного слоя бетона, не уменьшают обычных сроков службы конструкции.

Вследствие несоответствующего состава бетона, недостаточного уплотнения и ухода за бетоном или уменьшения толщины защитного слоя, пассивирующее действие бетона по отношению к арматуре даже в отсутствие трещин может быть утрачено уже через короткое время. Кроме того, для прогноза состояния конструкции необходимы данные об условиях среды эксплуатации (температура, относительная влажность воздуха и содержание в нем вредных веществ), которые могут иметь значительные и несистематические колебания во времени.

Коррозия стали в бетоне, по Тутти [2], может подразделяться на фазу от изготовления железобетонной конструкции до депассивации стальной поверхности вследствие карбонизации или действия хлоридов и следующую фазу разрушения. В строительных конструкциях, не подвергающихся действию хлоридов, депассивация поверхности стали, начинается только за счет карбонизации бетона.

До момента депассивации поверхности стали арматуры ее коррозия исключена. Скорость коррозии стали, начавшейся после депассивации стальной поверхности, зависит в основном от условий среды (влажность, температура) и качества (плотности) бетона. При постоянно водонасыщенном и сухом состоянии строительных конструкций, вследствие отсутствия кислорода или отсутствия влаги, коррозия не наступает. При относительной влажности 80...95% и особенно при переменных влажностных условиях коррозия имеет наибольшую скорость.

При воздействии хлоридов, период времени, в течение которого хлориды проникают до арматуры и достигают критического, вызывающего коррозию содержания, может быть определен, как и при карбонизации. Скорость коррозии, начавшейся после депассивации поверхности стали хлоридами, может быть оценена лишь грубо, поскольку она зависит от условий среды, содержания хлоридов у поверхности арматуры и состава бетона. Коррозия, вызванная хлоридами, имеет, как правило, концентрированный локальный характер и более высокую скорость, чем коррозия вследствие карбонизации.

Процесс карбонизации протекает в три этапа [3]: сначала углекислый газ, имеющийся в воздухе в естественных условиях, диффундирует через поверхность бетона в систему пор. В порах бетона CO_2 превращается частично в угольную кислоту. Последним шагом

являются реакции угольной кислоты с щелочными компонентами цементного камня, растворенными в поровой воде. При реакциях карбонизации щелочные компоненты бетона превращаются в карбонаты, значение pH бетона понижается до 9 и менее, так что защитное действие щелочей бетона для стальной арматуры в карбонизированном бетоне прекращается.

Чтобы оценить, в какой момент времени фронт карбонизации достигнет арматуры, необходимо знать развитие глубины карбонизации бетона во времени. После того как гидроксид кальция, имеющийся во внешнем слое у поверхности бетона, карбонизируется, CO₂ диффундирует через уже карбонизированный слой. Движущей силой при этом является разность концентрации CO₂ в наружном воздухе и у фронта карбонизации.

Диффузия диоксида углерода в бетоне при допущении стационарности процесса выражается сформулированным в 1955 г. А. Фиком и названным 1-м законом Фика диффузионным выражением в форме:

$$dQ = D \cdot A \cdot x^{-1} \cdot (c_1 - c_2) \cdot dt,$$

Где Q - количество диффундирующего диоксида углерода, г; A - поверхность, нормальная диффузионному потоку CO₂, см²; c_1 - содержание CO₂ в воздухе на внешней поверхности бетона, г/см³; c_2 - содержание CO₂ на границе карбонизации; t - время, с; x - глубина карбонизации, см; D - коэффициент диффузии CO₂, см²/с (зависит от состава бетона, степени гидратации, содержания влаги).

В качестве второго допущения может быть принято, что все количество CO₂ проникает до фронта карбонизации и там реагирует с продуктами гидратации цемента. При этом предусматривается, что до дальнейшего проникания диоксида углерода все способные карбонизироваться продукты гидратации цемента прореагируют:

$$dQ = a \cdot A \cdot dx,$$

где a - количество CO₂, необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации (зависит от состава бетона), г/см³.

Поскольку диффузия CO₂ в воздухе происходит примерно в 10⁴ раз быстрее, чем в воде - влажность бетонных образцов имеет решающее значение для скорости карбонизации бетона. Незащищенные наружные детали из железобетона, как правило, находятся под воздействием постоянно меняющейся влажности, что при прогнозировании можно учесть, используя усредненный (среднегодовой) коэффициент диффузии CO₂.

Период времени, в течение которого хлориды или другие коррозионные среды достигают критической, вызывающей коррозию бетона (арматуры) концентрации, также может быть определен, как и при карбонизации, по закону Фика.

Таким образом, определив экспериментальные коэффициенты диффузии бетона для каждой агрессивной среды при различных значениях влажности и решив приведенные выше дифференциальные уравнения можно оценить время достижения критической концентрации коррозионной среды в защитном слое бетона при различных условиях эксплуатации. Для решения системы уравнений Фика может быть эффективно использован метод конечных элементов реализованный в программном комплексе ELCUT, который позволяет учитывать специфические особенности конкретных железобетонных конструкций – геометрию, ширину и глубину раскрытия трещин и пр.

Моделирование карбонизации защитного слоя железобетона

При моделировании карбонизации защитного слоя бетона были использованы ориентировочные эффективные коэффициенты диффузии углекислого газа в бетоне в соответствии с пособием к СНиП 2.03.11-85 (табл. 3). Для бетона нормальной проницаемости (марка по водонепроницаемости W4) эффективный коэффициент диффузии принимался равным $D = 1 \cdot 10^{-4}$, см²/с, для бетона особо низкой проницаемости (марка по водонепроницаемости W8 и более) - $D = 0,04 \cdot 10^{-4}$, см²/с. Диаметр арматуры принимался равным 32 мм, толщина защитного слоя бетона - 50 мм. Рассматривались варианты раскрытия трещин 0,1; 0,2 и 0,3 мм.

Количество CO₂, необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации в соответствии с пособием к СНиП 2.03.11-85 равняется:

$$a = 0,4 \cdot f \cdot p \cdot Ц$$

где $Ц$ - численно равно содержанию цемента в бетоне, кг/м³; p — количество основных окислов в цементе в пересчете на CaO в относительных величинах по массе по данным химического анализа, (принимали 0,6); f — степень нейтрализации бетона равная отношению количества основных окислов, прореагировавших с углекислым газом, к общему их количеству в цементе (принимали 0,6). Таким образом, реакционная ёмкость бетона при расходе цемента в бетоне 440 кг/м³ принималась равной:

$$a = 0,4 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot Ц = 63,4 \text{ кг/м}^3$$

В результате расчетов по модели было установлено существенное увеличение глубины карбонизации защитного слоя бетона имеющего микродефекты с увеличением их ширины (рис.1).

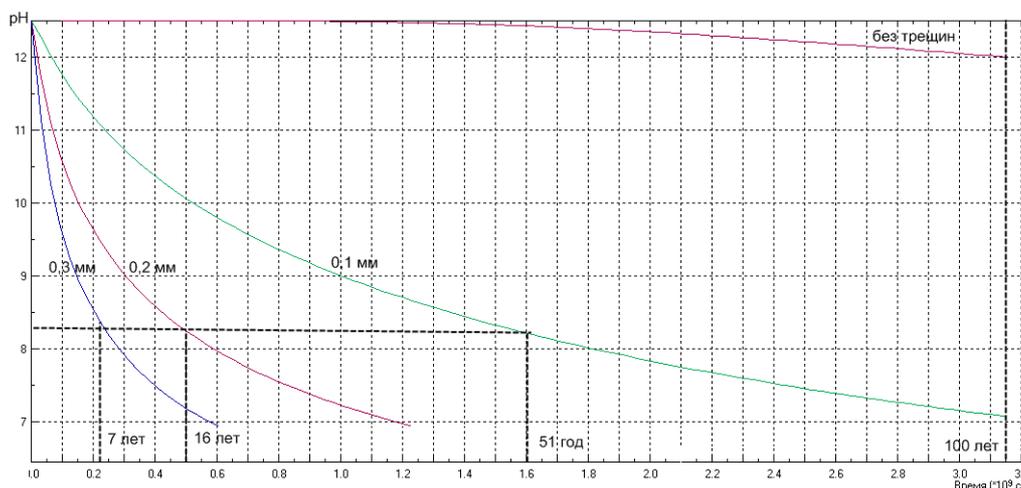
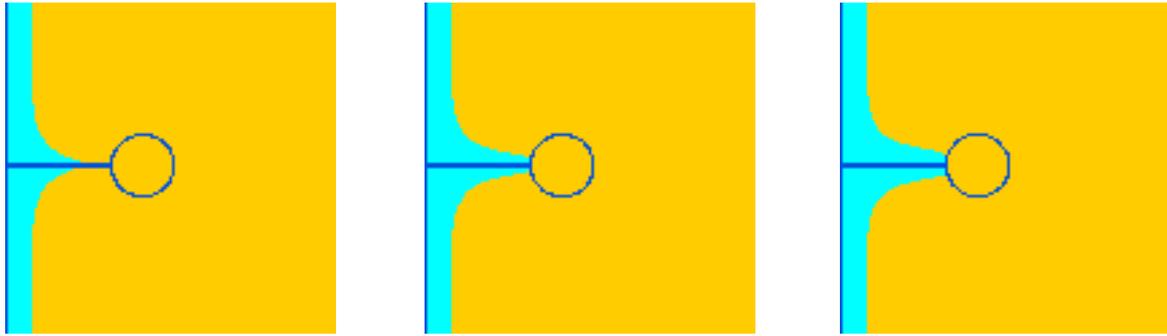


Рис.1 Изменение pH защитного слоя бетона нормальной проницаемости у поверхности арматуры в зависимости от ширины раскрытия трещин

Так при использовании бетона нормальной проницаемости (рис.2) несмотря на то, что через 50 лет глубина общего фронта карбонизации не превышает 12 мм, в трещинах 0,2-0,3 мм он может достигать поверхности арматуры (участки арматуры шириной ~7-9 мм соответственно), с последующей депассивацией и коррозией стали.



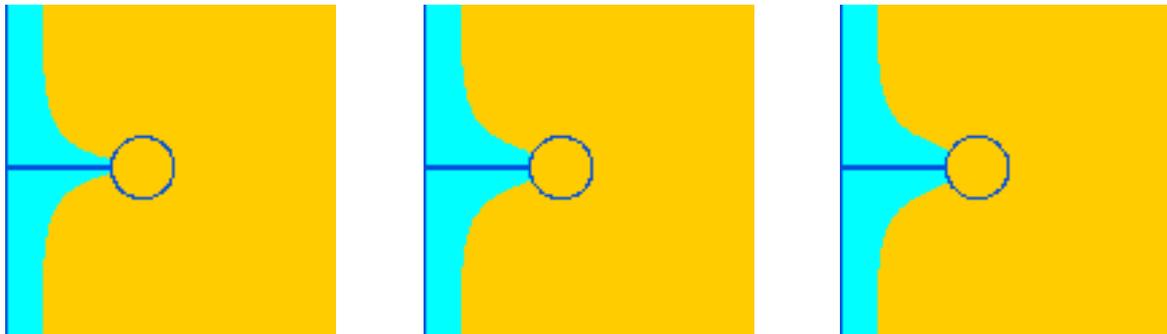
трещины: 0.1 мм

0.2 мм

0.3 мм

Рис.2 Карбонизация защитного слоя бетона нормальной проницаемости в воздушной среде за 50 лет

Через 100 лет фронт карбонизации в трещинах 0,1 мм у поверхности арматуры достигает ширины ~8 мм при общей глубине карбонизации 18 мм (рис.3). При этом в трещинах 0,2 и 0,3 мм ширина контакта карбонизованного слоя бетона с поверхностью арматуры увеличивается до 13 и 16 мм соответственно.



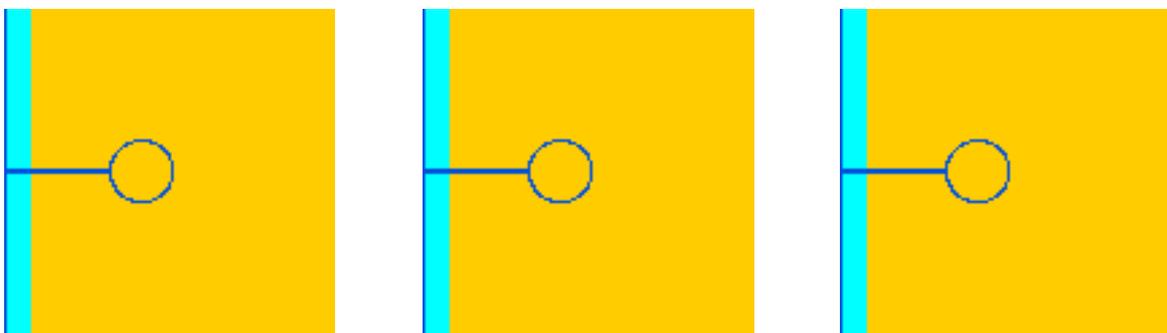
трещины: 0.1 мм

0.2 мм

0.3 мм

Рис.3. Карбонизация защитного слоя бетона нормальной проницаемости в воздушной среде за 100 лет

При эксплуатации конструкции в воде коэффициент диффузии CO_2 снижается в $\sim 10^4$, в результате чего карбонизация защитного слоя бетона в области трещин не выходит за границы общего фронта карбонизации бетона (рис.4).



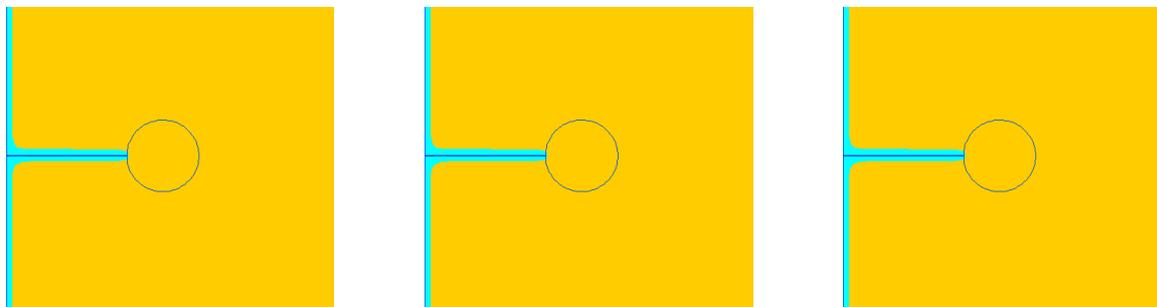
трещины: 0.1 мм

0.2 мм

0.3 мм

Рис.4. Карбонизация защитного слоя бетона нормальной проницаемости в водной среде за 100 лет

При использовании бетона особо низкой проницаемости, карбонизация по всей глубине трещин происходит практически в первые годы эксплуатации конструкции, хотя контакт карбонизованного слоя бетона с поверхностью арматуры можно охарактеризовать как локальный. Так при эксплуатации на протяжении 50 лет в трещинах 0,1; 0,2 и 0,3 мм ширина контакта карбонизованного слоя бетона с поверхностью арматуры составила ~2,5; 3 и 3,5 мм соответственно, при общей глубине фронта карбонизации бетона 2,5 мм (рис.5).



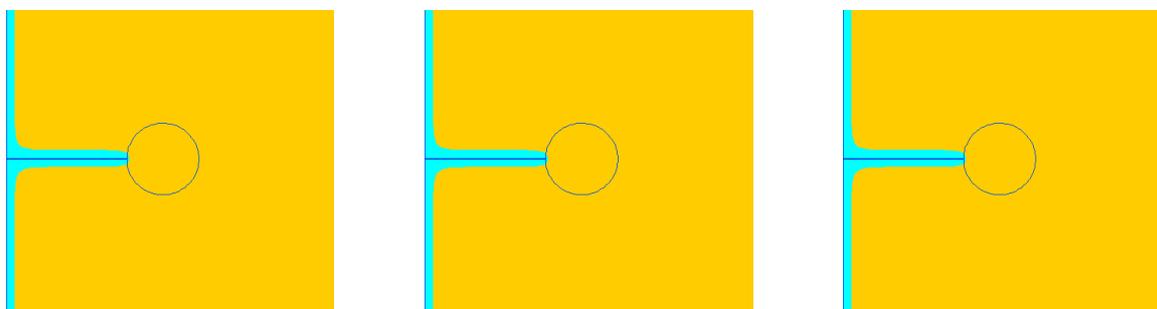
трещины: 0.1 мм

0.2 мм

0.3 мм

Рис.5. Карбонизация защитного слоя бетона особо низкой проницаемости в воздушной среде за 50 лет

После 100 лет эксплуатации ширина контакта карбонизованного слоя бетона с поверхностью арматуры в трещинах 0,1; 0,2 и 0,3 мм увеличилась до ~ 4; 4,5 и 5 мм соответственно, при глубине общего фронта карбонизации защитного слоя бетона 3,6 мм (рис.6).



трещины: 0.1 мм

0.2 мм

0.3 мм

Рис.6. Карбонизация защитного слоя бетона особо низкой проницаемости в воздушной среде за 100 лет

Используя экспериментально полученную скорость коррозии депассивированной стали, посредством метода конечных элементов можно оценить время возникновения опасных напряжений вследствие образования продуктов коррозии. Так на рис.7 приведены напряжения, возникающие в бетоне при коррозии арматуры на глубину от 0,1 до 1 мм (ширина очага коррозии от 3 до 11 мм соответственно), рассчитанные с использованием метода конечных элементов. Как видно из рис.7 коррозия арматуры на глубину более 0,2 мм способна вызвать деформации в контактной зоне бетона и арматуры превышающие прочность бетона на растяжение.

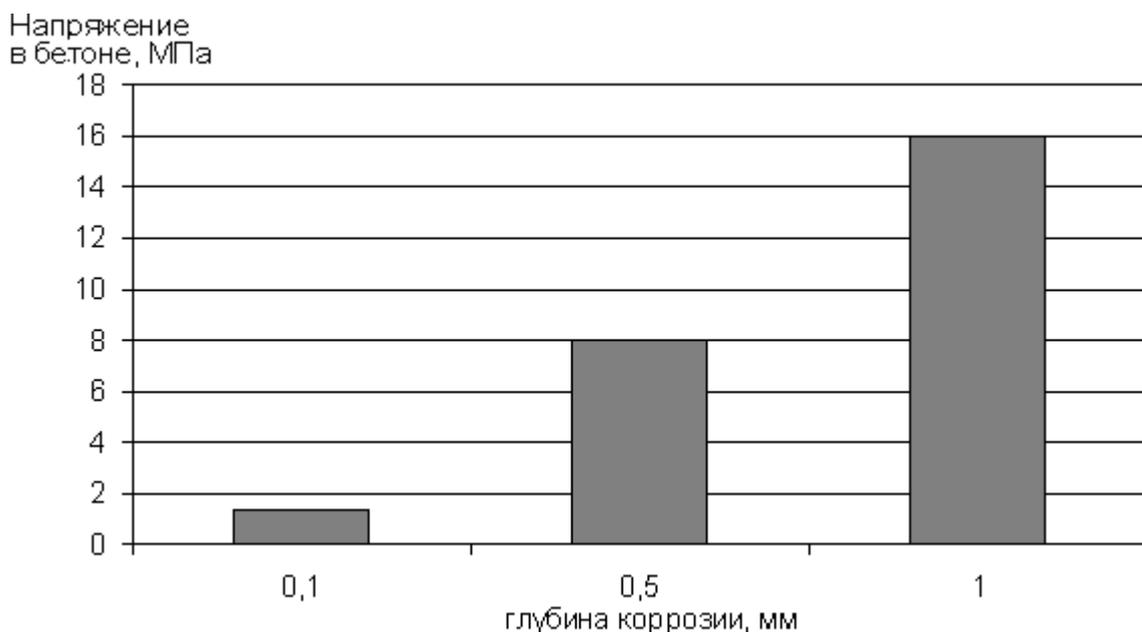


Рис.7. Напряжения в контактной зоне бетона В50 и арматуры при различной глубине коррозии арматуры

Выводы

Предложенная методология прогнозирования долговечности железобетонных конструкций позволяет учитывать наличие микродефектов защитного слоя бетона, что существенно повышает точность прогноза. При этом метод конечных элементов позволяет оценить критическое значение коррозии стали арматуры с точки зрения возникновения опасных напряжений вследствие образования продуктов коррозии.

Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций методом конечных элементов является логическим продолжением прогнозирования термонапряженного состояния бетона монолитных конструкций [4].

Литература

1. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П. / Долговечность железобетона в агрессивных средах: Совм. изд. СССР - ЧССР - ФРГ - М.: Стройиздат, 1990. - 320 с
2. Tuutti, K.: Corrosion of Steel in Concrete. CBI-Forschuiig, April 1982.
3. Knofel, D.: Carbanatisierung von Beton. In: Bautenschutz Bausanierung, Sonderheft (1983), S. 58-63
4. Троян В.В. Термонапружений стан залізобетону як аспект довговічності монолітних конструкцій // Науково-технічний збірник «Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка». Вип. 35 Київ: Товариство "Знання" України 2010 р. – с. 119-124.

УДК 693.5

Моделювання довговічності залізобетонних конструкцій / Троян В.В. // Збірник Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2010 – № 37 – С. 1- 6: рис.7. Бібліограф.:4 назв.

Запропоновано методологію прогнозування довговічності залізобетонних конструкцій, яка дозволяє враховувати їх специфічні особливості (ширину розкриття тріщин, геометрію та ін.). Спрогнозовано довговічність в повітряному середовищі захисного шару бетону з мікродефектами.

УДК 693.5

Моделирование долговечности железобетонных конструкций / Троян В.В. // Збірник Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2010 – № 37 – С. 1- 6: рис.7. Библиограф.:4 назв.

Предложена методология прогнозирования долговечности железобетонных конструкций позволяющая учитывать их специфические особенности (ширину раскрытия трещин, геометрию и пр.) Спрогнозирована долговечность в воздушной среде защитного слоя бетона с микродефектами.

UDK 693.5

Simulation of durability of reinforced concrete structures / Troyan V. // Збірник Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2010 – № 37 – P. 1- 6: fig.7. Refs.:4 titles.

The methodology of prediction of durability of reinforced concrete structures with regard for their specific characteristics (crack opening width, geometry, etc.) proposed. Forecasted durability in air of the protective layer of concrete with microdefects.