

УДК 691.328

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

*д-р техн. наук, проф. В.В. БАБИЦКИЙ; канд. техн. наук С.Н. КОВШАР
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Рассматривается метод прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций при агрессивном воздействии углекислого газа и жидких сред, содержащих хлор-ионы. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований авторов по обозначенной проблеме. Показано, что реализовать идею прогноза коррозионного состояния стальной арматуры железобетона можно только учитывая степень гидратации вкупе с традиционными влияющими факторами, определяющими динамику изменения структуры цементного камня и бетона, а следовательно и коррозионное состояние железобетона.

Ключевые слова: бетон, железобетонные конструкции, стальная арматура, метод прогнозирования коррозионного состояния.

Высокая щелочность поровой жидкости бетона и отсутствие в ней агрессивных ионов, ограниченность доступа кислорода создают ту благоприятную среду, в которой стальная арматура железобетона находится (и может находиться достаточно долго) в пассивном состоянии. Однако при определенных условиях сложившийся баланс нарушается, что вызывает переход стали в активное состояние с неизбежной последующей коррозией. Депассивация стали в бетоне может осуществляться по причинам карбонизации защитного слоя или накопления агрессивных ионов в приарматурной зоне бетона сверх определенного, так называемого критического, количества. В конечном итоге долговечность железобетона определяется как внешними (условия эксплуатации), так и внутренними (структура бетона) факторами. И закладывается она уже на стадиях проектирования состава бетона и реализации технологических приемов формирования и твердения конструкции.

Для математического описания длительности инкубационного периода (периода пассивного состояния стальной арматуры) российские ученые [1–3] предложили аналитические зависимости, учитывающие эффективные коэффициенты диффузии (ЭКД) агрессивных веществ в защитном слое бетона, и которые по причине масштабов их применения и общей признанности можно назвать классическими.

В случае карбонизации бетона текущую глубину нейтрализации можно рассчитать по уравнению:

$$x_k = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \tau \cdot D_{CO_2}}{m_0 \cdot \frac{C}{300}}}, \text{ см}, \quad (1)$$

где c – концентрация углекислого газа в воздухе, доли единицы по объему; τ – длительность эксплуатации конструкции, с; D_{CO_2} – эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне, $\text{см}^2/\text{с}$; m_0 – реакционная емкость бетона при расходе цемента $300 \text{ кг}/\text{м}^3$ (может быть принята равной $42,0 \text{ см}^3$); C – расход цемента в 1 м^3 бетона, кг.

Если глубина карбонизации превышает толщину защитного слоя бетона, происходит активация стальной арматуры.

При диффузионном характере накопления хлор-ионов в приарматурной зоне бетона концентрация раствора хлоридов в поровой жидкости бетона (C_x) может быть рассчитана по уравнению:

$$C_x = C_0 \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \frac{h}{2 \cdot \sqrt{D_{Cl} \cdot \tau}} \right), \%, \quad (2)$$

Здесь C_0 – концентрация хлор-ионов в растворе во внешней среде, %; h – глубина расположения слоя бетона, см; D_{Cl} – эффективный коэффициент диффузии ионов хлора в бетоне, $\text{см}^2/\text{с}$.

В последующем по величине C_x рассчитывают содержание хлор-ионов в приарматурной зоне, и если оно превышает критическое значение, делают вывод о возможности депассивации стальной арматуры.

Зависимости (1) и (2) связывают кинетику деградации защитного слоя как с внутренними параметрами бетона, характеризующимися эффективными коэффициентами диффузии, так и внешними и могут быть положены в основу разрабатываемой модели прогнозирования коррозионной стойкости желе-

зобетона. Однако их решение должен предварять расчет (а не длительное и дорогостоящее экспериментальное определение) количественных значений ЭКД углекислого газа и хлор-ионов в бетоне, что, однако, не нашло должного отражения в литературных источниках.

Задача может быть решена на основе прогнозирования структурных особенностей бетона: «...Конечной целью изучения структуры бетона является установление связи между характеристиками структуры и свойствами бетона (прочностью, деформативностью и долговечностью...)» [4].

И если реализовывать идею прогноза долговечности еще на стадии изготовления железобетонных конструкций, необходимо получение на основе состава бетона аналитических зависимостей для расчета диффузионных характеристик с последующим прогнозированием коррозионного состояния стальной арматуры железобетона по выражениям (1) и (2).

Современные представления, развивающиеся в бетоноведении, позволяют это сделать. Но в данном случае нельзя ограничиваться традиционными влияющими факторами (основными из которых обычно являются водоцементное отношение и расход цемента), поскольку они постоянны и не изменяются во времени. Описать свойства бетона, изменяющиеся во времени, можно только с привлечением такого динамического параметра, как степень гидратации цемента. Именно степень гидратации вкупе с традиционными влияющими факторами определяет динамику изменения структуры цементного камня и бетона, а следовательно и коррозионное состояние железобетона.

Сама степень гидратации цемента находится в достаточно сложной, но поддающейся математическому описанию функциональной зависимости от множества факторов – свойств цемента, водосодержания цементного теста, вида и количества введенных химических добавок, условий и времени твердения и др. [5].

Не останавливаясь на теоретических выкладках, анализе проведенных экспериментов, представим конечные выражения для расчета необходимых параметров бетона.

Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа предлагается рассчитывать по формуле

$$D_{CO_2} = \frac{k_{uCO_2} \cdot \Pi_k^2}{\sqrt[3]{V_k^2}}, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (3)$$

где k_{uCO_2} – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на диффузионную проницаемость бетона (для портландцемента может быть принят равным 0,025 см²/с); Π_k – капиллярная пористость бетона, д. ед.; V_k – объем цементного камня в 1 м³ бетона, д. ед.

При расчете реакционной емкости бетона выражением $m_0 \cdot \frac{C}{300}$, как в (1), можно пренебречь и использовать формулу:

$$m_0 = k_{u,m_0} \cdot \alpha \cdot C \cdot (1 - \eta), \text{ см}^3, \quad (4)$$

где k_{u,m_0} – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на реакционную емкость бетона (для портландцемента может быть принят равным 0,205 см³/кг); α – степень гидратации цемента, д. ед.; η – содержание инертных минеральных добавок в вяжущем, д. ед.

Эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов может быть рассчитан следующим образом:

$$D_{Cl} = \frac{k_{\delta,Cl} \cdot (100 \cdot \omega_m)^{2,5}}{1 + 0,875 \cdot (W - 2)}, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (5)$$

где $k_{\delta,Cl}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида бетона на эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов (для тяжелого бетона на щебне может быть принят равным $1 \cdot 10^{-8}$ см²/с); ω_m – влажность (по массе) бетона защитного слоя, д. ед.; W – марка бетона по водонепроницаемости.

И наконец, как было установлено, критическое количество хлор-ионов, вызывающее переход стали из пассивного состояния в активное, также зависит от структурных особенностей бетона (а не принимается постоянным и равным 0,4% от массы цемента) и может быть рассчитано для бетона без добавки ингибитора коррозии стали:

$$Cl_u^{kp} = \sqrt[3]{\frac{k_{u,Cl}}{\Pi_k}}, \text{ \%}. \quad (6)$$

В формуле (6) $k_{u,Cl}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на критическое количество хлор-ионов (для портландцемента может быть принят равным 0,0335), а для бетона с добавкой

$$Cl_u^{кр.и} = Cl_u^{кр.и} + k_u \cdot D_u, \% \quad (7)$$

где k_u – безразмерный коэффициент, учитывающий эффективность добавки ингибитора коррозии стали; D_u – содержание добавки ингибитора в приарматурной зоне бетона, %.

Полученные (и иные) выражения использованы для разработки элементов (обобщенная модель прогнозирования пока еще далека от идеала, поэтому речь идет именно об элементах) прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетона на стадии проектирования состава бетона.

Структурная схема расчетов проиллюстрирована на рисунке 1. Она представляет собой симбиоз «технологических» и «эксплуатационных» влияющих факторов.



Рисунок 1. – Схема прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций

В «технологические» факторы, определяющие структурные особенности бетона, включены:

- вид (портландцемент, шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент);
- свойства (активность, нормальная плотность, плотность, минералогический состав и др.);
- расход вяжущего;
- вид, свойства (крупность, содержание пылевидных и глинистых включений и др.);
- расход мелкого и крупного заполнителей;
- вид (ускорители твердения, пластификаторы, ингибиторы коррозии стали) и дозировки химических добавок.

Состав бетона определяется: свойствами компонентов бетонной смеси; маркой бетонной смеси по удобоукладываемости; классом бетона по прочности на сжатие; марками бетона по морозостойкости и водонепроницаемости; условиями твердения изделий (нормальное или тепловлажностная обработка); отпускной прочностью.

Указанные и иные факторы позволяют рассчитать структурные особенности цементного камня и бетона и, в конечном счете, ЭКД углекислого газа и хлор-ионов (а также ионов, ингибирующих коррозию стали), реакционную емкость бетона и критическое количество хлор-ионов (без или с добавкой ингибитора коррозии стали).

В свою очередь, к «эксплуатационным» факторам можно отнести:

- толщину защитного слоя бетона;
- время и температурно-влажностные условия эксплуатации;
- концентрацию углекислого газа в воздухе и хлор-ионов в растворе на поверхности железобетонной конструкции;

- воздействие атмосферных осадков;

- возможные проливы разной интенсивности технологических жидкостей, содержащих хлор-ионы.

Совокупность этих «технологических» и «эксплуатационных» факторов, изменяющихся в процессе эксплуатации железобетона, и определяет длительность пассивного состояния стальной арматуры.

Оценка достоверности расчетов. Для этого сопоставим расчетные значения их с некоторыми фактическими данными, почерпнутыми из отдельных источников.

В РУП «БелДорНИИ» проведены достаточно обширные натурные исследования прочности бетона на сжатие и глубины карбонизации бетона в железобетонных конструкциях автодорожных мостов республики, построенных в период с 1954 по 1989 год.

Однако результаты обследования мостов, не дают полной информации о материалах, использованных при их строительстве, и составах бетона. Поэтому необходимые для прогноза данные были получены косвенным путем. Возраст постройки, предполагаемые условия твердения позволили по прочности на момент обследования рассчитать прочность бетона к началу эксплуатации железобетона. По этому параметру и предполагаемым удобоукладываемости бетонной смеси и марке цемента проведены расчеты состава бетона. Далее, в соответствии с описанной выше последовательностью проведены расчеты глубины карбонизации бетона и наглядно проиллюстрированы на рисунке 2.



Рисунок 2. – Соотношение фактических и расчетных значений карбонизации бетона мостовых железобетонных конструкций

Как видим, результаты достаточно удовлетворительны, что подтверждается и статистическими выкладками – коэффициент вариации отклонений расчетных данных от фактических составил 25,8%, что, на наш взгляд, вполне приемлемо для практических расчетов. Имеющие место отклонения легко объясняются тем, что значительное количество факторов, не были учтены (например, вид цемента, концентрация углекислого газа, влажностное состояние бетона, атмосферные осадки и др.).

Сопоставим также результаты расчета с результатами обследования моста в Ярославской области, описанными в [6]. На момент обследования, проведенного через 23 года после начала эксплуатации, установлено, что средняя толщина бетона защитного слоя составила 28 мм, а с обеспеченностью 95% – 24 мм. Содержание хлор-ионов в слое толщиной 10 мм составляет 0,6%, глубина карбонизации бетона – 18,5 мм.

Однако в примере отсутствуют технические характеристики бетона конструкций и условия их эксплуатации, но для приближенной оценки можно предположить, что при изготовлении конструкций использован бетон класса В30, а концентрация хлор-ионов во внешней среде составляла около 5%.

В результате теоретических расчетов получено, что на момент обследования содержание хлор-ионов в приарматурной зоне должно составить около 0,14% от массы растворной части бетона. Коррозию арматуры по причине накопления ионов хлора сверх критического количества следует ожидать через 28 лет после начала эксплуатации для толщины бетона защитного слоя 28 мм или через 21 год для толщины 24 мм, а глубина карбонизации бетона к возрасту 23 года должна составить 17,3 мм.

Сравнительный анализ показывает, что значения, прогнозируемые на стадии проектирования состава бетона, и значения фактические, полученные в результате обследования моста, достаточно близки.

Заключение. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что предлагаемые элементы прогнозирования долговечности железобетонных конструкций на стадии их изготовления, на наш взгляд, достаточно достоверны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной производственной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с.
2. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин [и др.] ; под общ. ред. В.М. Москвина. – М. : Стройиздат, 1980. – 536 с.
3. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев [и др.]. – М. : Стройиздат, 1990. – 320 с.
4. Горчаков, Г.И. О комплексной характеристике структуры бетона / Г.И. Горчаков, И.А. Иванов // Бетон и железобетон. – 1980. – № 1. – С. 22.
5. Бабицкий, В.В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / В.В. Бабицкий // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – № 1. – С. 76–79.
6. Васильев, А.И. Вероятностные оценки срока службы эксплуатируемых автодорожных мостов в условиях коррозии арматуры / А.И. Васильев // Бетон и железобетон. – 2003. – № 2. – С. 17–20.

Поступила 07.06.2016

ELEMENTS OF FORECASTING OF THE CORROSION CONDITION OF THE IRON FITTINGS OF FERRO-CONCRETE

V. BABITSKI, S. KOVSHAR

We consider the prediction method for corrosion of steel reinforcement ferro-concrete designs with aggressive carbon dioxide and liquid media containing chlorine ions. The results of theoretical and experimental studies of the authors on the aforesaid. It is shown that to realize the idea of a steel concrete reinforcement corrosion condition prognosis can only be given the degree of hydration, along with the traditional insulated factors determining the dynamics of the cement stone and concrete structures, and hence the state of corrosion of reinforced concrete.

Keywords: concrete, ferro-concrete designs, steel armature, prediction method of corrosion condition.