

С.Н. ЛЕОНОВИЧ, д-р техн. наук, Белорусский национальный технический университет;
А.В. ПРАСОЛ, магистр техн. наук, Белорусский государственный университет транспорта
(Минск)

Железобетон в условиях хлоридной коррозии: деформирование и разрушение

На основе анализа экспериментальных исследований по взаимодействию конструкций с хлоридсодержащими средами [1–4], а также существующих моделей взаимодействия конструкций с различными агрессивными средами можно предположить, что коррозионное разрушение железобетонных элементов вследствие хлоридной агрессии может быть представлено в виде следующей диаграммы (рис. 1), где 1 – работа защитного покрытия в течение инкубационного периода до начала проникновения хлоридов в железобетонный элемент; 2 – проникание хлоридов в железобетонный элемент и распределение их по его объему; 3 – наступление условий коррозии для арматуры; 4 – развитие коррозионного поражения арматуры с уменьшением ее сечения и образованием продуктов коррозии; 5 – коррозионное растрескивание бетона вокруг корродирующей арматуры; 6 – прорастание трещины сквозь бетон до поверхности конструктивного элемента; 7 – отслаивание защитного слоя бетона под давлением продуктов коррозии арматуры; 8 – работа конструктивного элемента с отслоившимся защитным слоем и нарушение сцепления прородированной арматуры с бетоном; 9 – разрушение конструктивного элемента вследствие наступления предельного состояния.

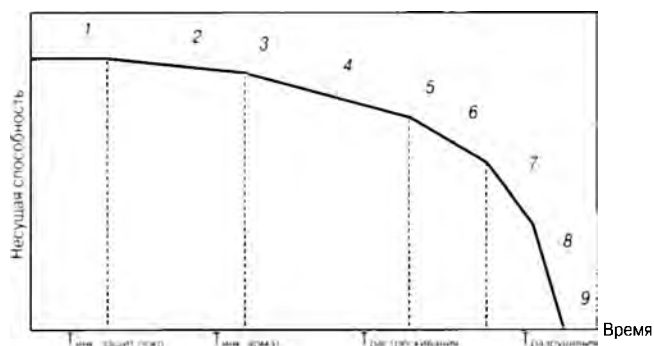


Рис. 1. Диаграмма снижения несущей способности под воздействием хлоридсодержащей среды

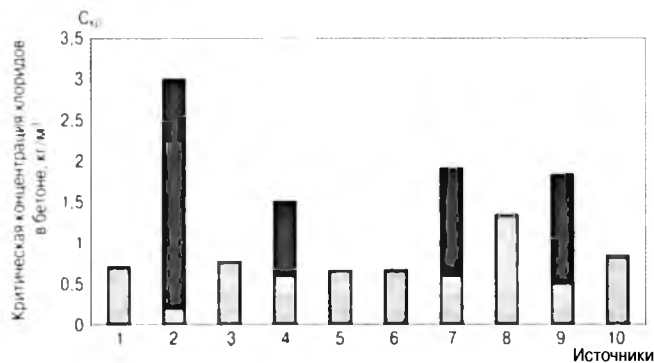


Рис. 2. Критическая концентрация хлоридов в бетоне, кг/м³, по данным: 1 – Levis D.A. (1962); 2 – Hausmann D.A. (1967); 3 – Berman H.A. (1972); 4 – Clear K.C., Hay R.E. (1973); 5 – Clear K.C. (1974); 6 – Stratfull R.F., Spellman D.L. (1975); 7 – Cady P.D. (1978); 8 – Brown R.D. (1982); 9 – Pfeifer D.W., Landgren J.R., Zoob A. (1986); 10 – Frangopol D.M. (1997)

Стальная арматура в бетоне защищена от коррозии тонкой пассивирующей пленкой, состоящей из оксидов железа, которая формируется на поверхности арматуры из-за сильнощелочной среды поровой влаги бетона. Коррозия арматурной стали начинается при разрушении пассивирующей пленки (депассивации).

Депассивация арматуры происходит в присутствии хлоридов пороговой или критической концентрации. Негативному воздействию хлорид-ионов в бетоне противопоставлены гидроксид-ионы, способствующие самозалечиванию пассивирующей пленки. Критической по опасности коррозии арматуры концентрацией хлорид-ионов в бетоне считают такую, при которой скорости процессов пассивации и депассивации одинаковы. Уровень критической концентрации хлоридов в бетоне зависит от pH-фактора бетона влажности бетона и концентрации агрессивного раствора в окружающей бетон среде. Результаты расчетов критической концентрации хлоридов представлены на рис. 2, 3 и в таблице.

После периода инициирования коррозия арматуры развивается в бетоне и приводит к образованию ржавчины, которая увеличивает давление, т. е. напряжение, в зоне сцепления арматуры и бетона. С распространением коррозии ее продукты, главным образом гидроксиды железа Fe(OH)₂ и Fe(OH)₃, занимают намного больший объем, чем арматура, таким образом оказывая давление на окружающий бетон. Давление возрастает и вызывает образование трещин в бетоне. Трещина простирается через защитный слой, и в конечном счете напряжение приводит к разрушению бетона.

Железобетонная конструкция моделируется как толстостенный цилиндр под внутренним радиальным давлением. Схематическое представление процесса коррозии, вызывающего образование трещин в бетоне, показано на рис. 4.

При развитии коррозии продукты ржавчины заполняют поры бетона полностью и затем оказывают давление на бетон (рис. 4). Внутренний радиус будет увеличиваться, поэтому внутренний радиус толстостенного бетонного цилиндра $a(t)$ может быть выражен как:

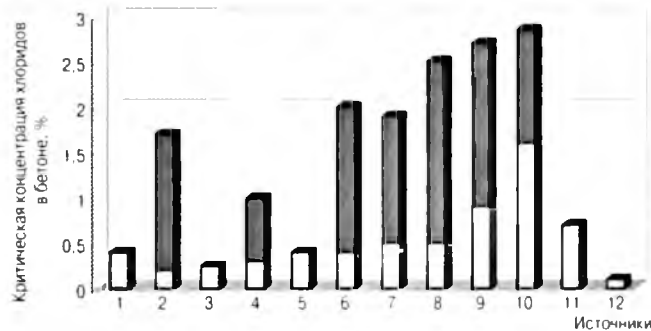


Рис. 3. Критическая концентрация хлоридов в бетоне, % мас. вяжущего: 1 – Алексеев С.Н., Иванов Ф.М. (1990); 2 – Vassie P. (1984); 3 – West R.E. (1985); 4 – Henriksen C.F. (1973); 5 – Bamforth P.B. (1994); 6 – Hansson C.M. (1990); 7 – Tuutti K. (1993); 8 – Schiessl P. (1990); 9 – Petterson P.E. (1993); 10 – Lambert P. (1991); 11 – Schiessl P. (2004); 12 – Moser K., Edwardsen C. (2002)

Сталь	Арматура	Критическая концентрация Cl_{lim} , % массы вяжущего
Углеродистая	Ненапряженная	0,4
	Напряженная	0,2
Нержавеющая	Ненапряженная	1
	Напряженная	0,4

$$a(t) = \left[D + \frac{2d_0}{2} \right] + d_s(t) \quad (1)$$

где $d_s(t)$ – толщина продуктов коррозии, вызывающих растягивающие напряжения. Эту величину можно выразить:

$$d_s(t) = \frac{W_{rust}}{\pi(D+2d_0)} \left(\frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{\alpha_r}{\rho_{st}} \right) \quad (2)$$

где α_r – коэффициент, зависящий от типа продуктов коррозии; ρ_{rust} – плотность продуктов коррозии; ρ_{st} – плотность арматуры; W_{rust} – масса продуктов коррозии (ржавчина), которые вызывают критическое растягивающее напряжение.

Принято, что как только ржавчина полностью заполняет пространство между бетоном и арматурой, последующий рост коррозии приведет к появлению растягивающих напряжений. W_{rust} можно определить измерением плотности тока коррозии I_{corr} в $\mu A/cm^2$ и рассчитать по формуле (3):

$$W_{rust} \left(\int_0^t 0,098 \frac{1}{\alpha_r} \pi D I_{corr} dt \right)^{1/2} \quad (3)$$

Плотность потока коррозии I_{corr} можно определить для изгибаемых железобетонных конструкций как:

$$I_{corr} = 0,3683 \ln(t) + 1,1305, \quad (4)$$

где t – время, год.

Растягивающее напряжение по теории упругости может быть получено следующим образом:

$$\sigma_r(t) = P_r(t) = \frac{2E_{ef}d_s(t)}{(D+2d_0) \left(\frac{b^2+a^2(t)}{b^2-a^2(t)} + \nu_r \right)} \quad (5)$$

где E_{ef} – эффективный модуль упругости бетона; ν_r – коэффициент Пуассона для бетона; b – внешний радиус толстостенного бетонного цилиндра; $a(t)$ – внутренний радиус толстостенного бетонного цилиндра.

Минимальное напряжение, необходимое для образования трещин в защитном слое бетона, связано с прочностью бетона при растяжении и толщиной защитного слоя и σ_T может быть выражено как:

$$\sigma_T = \frac{2c \cdot f_t}{D+2d_n} \quad (6)$$

где f_t – прочность бетона при растяжении.

Одним из факторов, влияющих на скорость коррозии, является ширина раскрытия силовых трещин. С развитием коррозии ширина раскрытия трещин увеличивается, что вызывает отслаивание и разрушение бетона и в конечном счете разрушение.

Для оценки механического повреждения вследствие увеличения объема продуктов коррозии вокруг арматуры необходимо посредством упругого анализа рассчитать эквивалентное однородное внутреннее давление вокруг арматуры и напряжения в окружающем бетоне. В этой модели бетон рассматривается как толстостенный цилиндр, на который воздействует внутреннее давление продуктов коррозии.

Время начала отслаивания и разрушения бетона определено как момент времени, в который растягива-

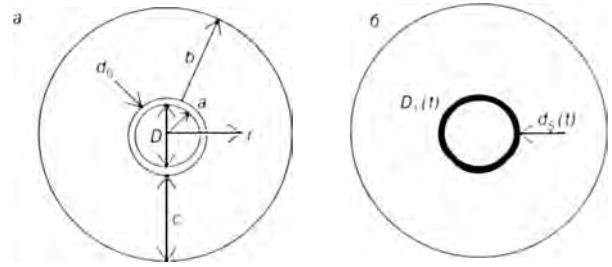


Рис. 4. Образование трещин под давлением продуктов коррозии: D – диаметр арматурного стержня; d_0 – толщина слоя продуктов коррозии в зоне сцепления арматуры и бетона; a и b – внутренние и внешние радиусы толстостенного бетонного цилиндра; c – толщина защитного слоя бетона

ющие усилия внутри толстостенного цилиндра превышают прочность бетона.

Иницирование трещин можно выразить:

$$\frac{\sigma_c}{f_t} = \frac{(c \cdot d)^2 + (c \cdot d)}{(c \cdot d)^2 + (c \cdot d) + 0,5} \quad (7)$$

Развитие трещин можно выразить:

$$\frac{\sigma_c}{f_t} = \frac{0,5 + (c \cdot d)}{1,665} \quad (8)$$

Достижение трещиной поверхности:

$$\frac{\sigma_c}{f_t} = 2(c/d + 0,5), \quad (9)$$

где σ_c – внутреннее давление, вызванное продуктами коррозии; f_t – прочность бетона при растяжении; c_{cov} – толщина защитного слоя бетона; d – диаметр арматуры.

Величина этих периодов времени зависит от скорости коррозии, прочностных свойств бетона, отношения толщины бетона к диаметру арматуры, расстояния между арматурными стержнями и от внешних воздействий.

Таким образом, рассмотрено несколько механизмов снижения эксплуатационной надежности и безопасности железобетонной конструкции вследствие коррозии. На несущую способность этих конструкций влияет и уменьшение сечения бетона (вследствие образования трещин и отслаивания), и уменьшение площади арматуры, и потеря сцепления между арматурой и бетоном. Чтобы смоделировать предельное состояние отказа конструкции, остаточную прочность необходимо определить в соответствии с рекомендациями, изложенными в [5].

Ключевые слова: коррозия арматуры, прочность бетона, пассивация, депассивация, разрушение конструкции.

Список литературы

1. *Леонович С.Н.* Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при хлоридной агрессии: Сб. тр. VII меж. науч.-метод. семинара. Брест: БрГТУ, 2001. 5 с.
2. *Леонович С.Н.* Вероятностная оценка коррозии арматуры в существующих железобетонных конструкциях при хлоридной агрессии: Сб. тр. VII меж. науч.-метод. семинара. Брест: БрГТУ, 2001. 5 с.
3. *Леонович С.Н.* Моделирование трещиностойкости в бетоне под действием корродирующей арматуры // Вестник БНТУ. 2010. № 6.
4. *Леонович С.Н., Прасол А.В.* Воздействие хлоридов на железобетонные конструкции: моделирование проникновения в бетон // Наука и техника. 2012. № 2. С. 34–38.
5. *Леонович С.Н., Прасол А.В.* Модели периода иницирования коррозии арматуры // Строительные материалы. 2012. № 9. С 74–75.