

УДК 624.21.01.07

С. Н. ЛЕОПОВИЧ, доктор технических наук, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, А. В. СТЕПАНОВА, магистр технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ: МОДЕЛИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ ХЛОРИДНОЙ КОРРОЗИИ

Процесс коррозии арматуры разделен на два основных периода: период иницирования (депассивация арматуры) и период распространения (образование и развитие трещин бетона, потеря сцепления между арматурой и бетоном). Представлена модель формирования и развития трещины вследствие коррозии арматуры.

**1 Снижение несущей способности под воздействием хлоридсодержащей среды.** 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 процесс коррозионного разрушения железобетонных элементов при хлоридной агрессии может быть представлен в виде диаграммы (рисунок 1), где:

- 1) работа защитного покрытия в течение инкубационного периода до начала проникания 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 её сечения, образованием продуктов коррозии;
- 5) процесс коррозионного растрескивания 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.

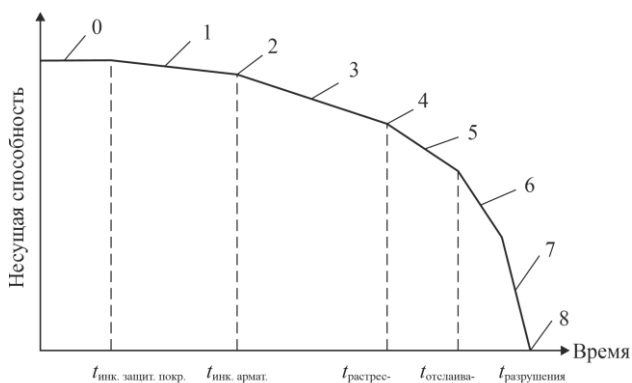


Рисунок 1 – Диаграмма снижения несущей способности под воздействием хлоридсодержащей среды

**2 Моделирование коррозии арматуры в период распространения.** Стальная арматура в бетоне защищена от коррозии тонкой пассивирующей пленкой, состоящей из оксидов железа, которая формируется на поверхности арматуры из-за сильно щелочной 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: рН-фактора бетона; влажности бетона и концентрации агрессивного раствора в окружающей бетон среде. Результаты расчетов критической концентрации хлоридов представлены на рисунках 2, 3 и в таблице 1.

После периода иницирования коррозия арматуры развивается в бетоне и приводит к образованию ржавчины, которая увеличивает давление (то есть напряжение) в зоне сцепления арматуры и бетона. С распространением коррозии, ее продукты (главным образом гидроксид железа,  $Fe(OH)_2$  и  $Fe(OH)_3$ ) занимают намного больший объем, чем арматура, таким образом оказывая давление на окружающий бетон.

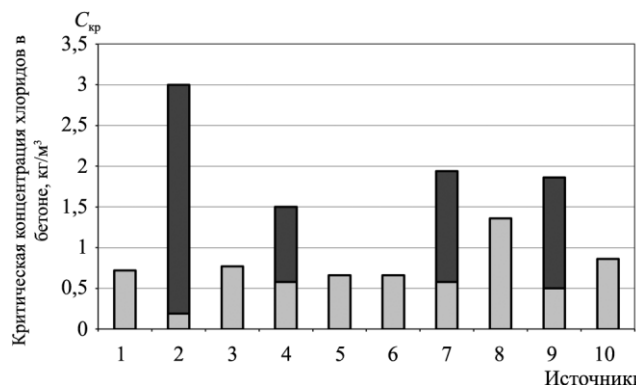


Рисунок 2 – Критическая концентрация хлоридов в бетоне, кг/м³: 1 – Levis D. A. (1962); 2 – Hausmann D. A. (1967); 3 – Berman H. A. (1972); 4 – Clear K. C., Hay R. E. (1973); 5 – Clear K. C. (1974); 6 – Stratfull R. F., Spellman D. L. (1975); 7 – Cady P. D. (1978); 8 – Brown R. D. (1982); 9 – Pfeifer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

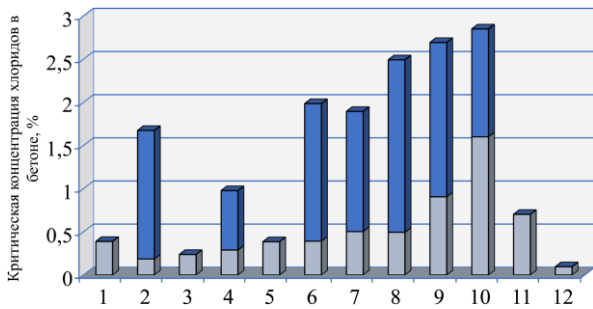


Рисунок 3 – Критическая концентрация хлоридов в бетоне (в % по массе вяжущего):

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 – Pettersson P. E. (1993); 10 – Lambert P. (1991); 11 – Schiessl P. (2004); 12 – Moser K., Edwardsen C. (2002)

Таблица 1 – Критическая концентрация хлоридов в бетоне В % по массе вяжущего

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

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 рисунке 4.

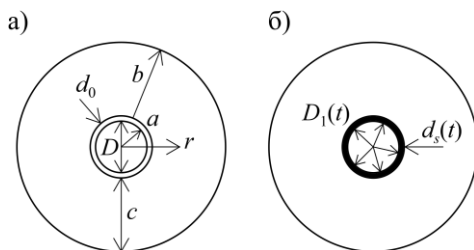


Рисунок 4 – Образование трещин под давлением продуктов коррозии:

а – образование трещин в бетоне; б – давление продуктов ржавчины на бетон;

$D$  – 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

При развитии коррозии продукты ржавчины заполняют поры бетона полностью и затем оказывают давление на бетон (см. рисунок 2). Внутренний радиус будет увеличиваться при развитии коррозии (то есть, увеличении объема продуктов ржавчины), поэтому внутренний радиус толстостенного бетонного цилиндра  $a(t)$  может быть выражен как:

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

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

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

$W_{rust}$  – масса продуктов коррозии (ржавчина), которые вызывают критическое растягивающее напряжение;  $\rho_{rust}$  – плотность продуктов коррозии;  $\alpha_r$  – коэффициент, зависящий от типа продуктов коррозии;  $\rho_{st}$  – плотность арматуры.

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  $I_{corr}$ ,  $\mu A/cm^2$ , 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 в годах.

Растягивающее напряжение по теории упругости может быть получено следующим образом:

$$\sigma_c(t) = P_1(t) = \frac{2E_{ef}d_s(t)}{(D + 2d_0) \left( \frac{b^2 + a^2(t)}{b^2 - a^2(t)} + \nu_c \right)}, \quad (5)$$

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

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

$$\sigma_t = \frac{2cf_t}{D + 2d_0}, \quad (6)$$

где  $f_t$  – прочность бетона на растяжение.

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 этом подходе бетон рассматривается как толстостенный цилиндр, на который воздействует внутреннее давление продуктов коррозии (рисунок 5).

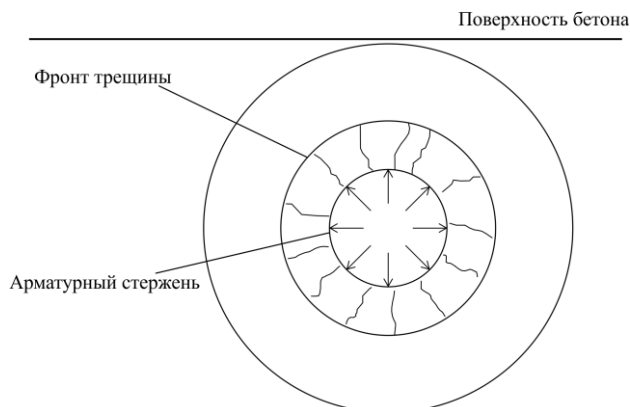


Рисунок 5 – Толстостенный цилиндр при воздействии продуктов коррозии

Время начала отслаивания и разрушения бетона определено как момент времени, в который растягивающие усилия внутри толстостенного цилиндра превышают прочность бетона (рисунок 6).

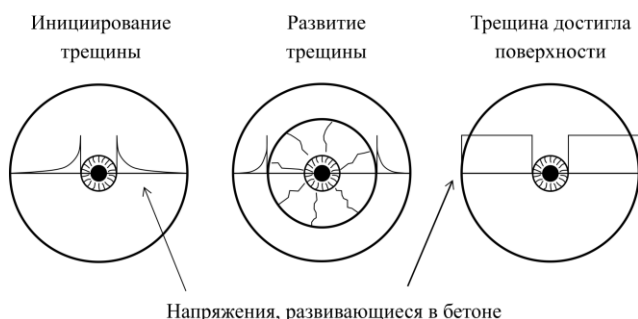


Рисунок 6 – Модели инициирования и распространения трещин

Инициирование трещин

$$\frac{\sigma_x}{f_t} = \frac{(c/d)^2 + (c/d)}{(c/d)^2 + (c/d) + 0,5}. \quad (7)$$

Развитие трещин

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

Получено 08.06.2012

**S. N. Leonovich, A. V. Stepanova.** Deformation and destruction of reinforcement structures: modeling in condition of chlorine corrosion.

The process of reinforcement corrosion divided into two time periods: initiation period (depassivation of the reinforcement) and propagation period (formation and propagation of cracks, bond failure). Model for cracks formation and propagation is presented.

Достижение трещиной поверхности

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

где  $\sigma_c$  – внутреннее давление, вызванное продуктами коррозии;  $f_t$  – прочность бетона на растяжение;  $c$  – 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.

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, остаточная прочность выражается в соответствии с рекомендациями статьи [5].

#### Список литературы

- 1 **Леонович, С. Н.** Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при хлоридной агрессии: сб. тр. VII междунар. науч.-метод. семинара / под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда. – Брест : БрГТУ, 2001.
- 2 **Леонович, С. Н.** Вероятностная оценка коррозии арматуры в существующих железобетонных конструкциях при хлоридной агрессии: сб. тр. VII междунар. науч.-метод. семинара / под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда. – Брест : БрГТУ, 2001.
- 3 **Леонович, С. Н.** Моделирование трещиностойкости в бетоне под действием корродирующей арматуры / С. Н. Леонович // Вестник БНТУ. – 2010. – № 6.
- 4 **Леонович, С. Н.** Воздействие хлоридов на железобетонные конструкции: моделирование проникновения в бетон / С. Н. Леонович, А. В. Прасол // Наука и техника. – 2012. – № 2. – С. 34–38.
- 5 **Леонович, С. Н.** Модели периода инициирования коррозии арматуры / С. Н. Леонович, А. В. Прасол // Строительные материалы. – 2012. – Июнь.