

Байдин О. В., канд. техн. наук, докторант  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## О СИЛОВОМ СОПРОТИВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПОВРЕЖДЕННОГО КОРРОЗИЕЙ\*

Oleg.v31@yandex.ru

*В статье рассматривается силовое сопротивление изгибаемых железобетонных элементов поврежденных коррозией. При этом отмечается значимость трещиностойкости железобетонных конструкций подверженных коррозионным воздействиям в условиях эксплуатации.*

**Ключевые слова:** силовое сопротивление, изгибаемый элемент, коррозионные повреждения, трещинообразование, обжатие железобетона.

Основной отличительной особенностью силового сопротивления железобетона, с учетом входящих в его состав компонентов структуры (щебень, цементный камень, арматура) и их совместной работы как анизотропного материала, является нелинейная неравновесная специфика деформирования. Эта специфика важна для оценки силового сопротивления, повреждений, надежности, конструктивной безопасности зданий и сооружений и т.п. В связи с этим современные научные разработки, согласовываясь с основными положениями физики, механики и термодинамики, развиваются в феноменологическом направлении, реализуясь при этом как в дискретных моделях, идущих вслед за сетевыми методами механики твердого деформируемого тела, так и в интегральных моделях железобетона [5].

Ввиду того, что у бетона ярко выражена анизотропия физико-механических свойств, его силовое сопротивление растяжению на порядок ниже силового сопротивления сжатию. В изгибаемых или растянутых конструктивных элементах этот недостаток компенсируется армированием. Силовое сопротивление бетона, арматуры, сцепления между ними и в целом железобетона отличают нелинейность связи между напряжениями и деформациями, накопление деформаций во времени (ползучесть бетона) и релаксация напряжений (в арматуре), частичная необратимость деформаций, возрастные изменения свойств (старение).

Повреждения материалов и конструкций могут быть силовыми (возникают вследствие напряжений превышающих расчетные – предельно допустимые) и средовыми (от воздействия внешней среды – жидкой и газообразной). Зачастую силовые воздействия проявляются в виде трещин, при этом снижается жесткость железобетонных элементов, а со временем при совокупном воздействии внешней агрессивной среды это может влиять на несущую способность и привести к разрушению.

Неизбежно эксплуатация железобетонных конструкций и сооружений в целом сопровождается воздействием внешней среды (жидкой или газообразной), которая в большинстве случаев может быть агрессивной по отношению к материалам железобетона (бетону и арматуре). Интенсивность (глубина и скорость) коррозионных повреждений зависит от многих факторов: плотности и проницаемости бетона, концентрации и скорости поступления к поверхности контакта агрессивной среды, при этом основным фактором, влияющим на проницаемость и развития трещин в реальной (эксплуатируемой) конструкции является уровень напряженного состояния. В работе [6] отмечается, что процесс коррозионных повреждений зависит от уровня действующих напряжений и в ходе нагружения железобетонной конструкции, с ростом напряжений и изменением структуры материала, меняется уровень коррозионного сопротивления. Следовательно, сам факт коррозии (коррозионных повреждений) – это следствие проникновения в глубь бетона агрессора в виде воздушно-влажностной среды, при этом эффект проникновения агрессивной среды зависит от проницаемости бетона, а трещиностойкость бетона определяет степень его проницаемости. Для конструкции, работающей под нагрузкой, главным фактором, влияющим на проницаемость бетона, будет являться уровень напряженного состояния [1]. При этом прогноз силового сопротивления образованию трещин у поврежденного коррозией железобетона необходим для оценки эксплуатационных возможностей конструкций первой категории трещиностойкости, а также при решении задач, связанных с анализом напряженно-деформируемого состояния железобетонных конструкций.

Построенный в работе [2] расчетный аппарат по нахождению (образованию) первой трещины у изгибаемого железобетонного элемента, поврежденного коррозией, в полной мере учитывает растянутую зону, нелинейность и

неравновесность сопротивления железобетона и дает расчетную формулу для вычисления  $M_{mp}$ :

$$M_{mp} = \frac{K_{lt}^* \varepsilon_{Rt}}{h - X} D^*, \quad (1)$$

при

$$\varepsilon_{Rt}^* = K_{lt}^* \varepsilon_{Rt}, \quad (2)$$

где  $M_{mp}$  – изгибающий момент, при котором образуется первая трещина;  $D^*$  – жесткость наиболее нагруженного (опасного) сечения поврежденного коррозией изгибаемого элемента;  $K_{lt}^*$  – коэффициент силового сопротивления для фибрового растянутого волокна;  $\varepsilon_{Rt}$  – предельная относительная деформация для фибрового растянутого волокна при изгибе (относительная полная деформация при изгибе, нормируется регламентными документами);  $h$  – высота сечения;  $X$  – высота сжатой зоны.

Выражение (1) устанавливает связь между моментом силового трещинообразования и жесткостью «опасного» сечения, зависящих, в свою очередь, от интенсивности коррозионных повреждений бетона и арматуры, нелинейности деформирования и ползучести. Это позволяет оценивать силовое сопротивление изгибаемых конструкций с учетом уровня напряженного состояния при заданных условиях эксплуатации.

Также следует отметить, что с точки зрения практической значимости, то есть недопущения проникновения коррозионной среды в глубь материалов железобетонных конструкций, стойкость к образованию трещин при условии эксплуатации железобетонных конструкций в агрессивных средах будет иметь решающее значение. Таким образом, обоснована важность трещиностойкости железобетонных конструк-

ций подверженных коррозионным воздействиям в условиях эксплуатации, что в свою очередь послужило поиску путей повышения сопротивления образованию силовых трещин эксплуатируемого, поврежденного коррозией железобетонного элемента, одни из которых рассмотрены в исследованиях [3, 4], где повышение трещиностойкости осуществляется за счет обжатия его растянутой части сечения.

В частности в работе [4], в интересах практического использования, следуя нормативным документам [7], где не нормируется изменение нагрузок во времени, а ограничивается их классификация по продолжительности действия (режимы нагрузок и воздействия могут быть указаны в техническом задании на проектирование), так же как и в большинстве теорий силового деформирования бетона в качестве эталонного режима принимаем неизменные во времени напряжения  $\sigma = const$ :

$$\frac{d\sigma}{dt} = 0. \quad (3)$$

В соответствии с (3), в работе [4] получен алгоритм расчета для вычисления потерь уровня обжатия железобетонного элемента с учетом ползучести бетона, релаксации напряжений в напрягаемой арматуре (канате), соотношения площадей компонентов сечения (процента армирования), как до коррозионных повреждений, так и после. Из этого следует решение:

$$\frac{\sigma_{\kappa}(t)}{\sigma_{\kappa}(t_0)} = \frac{1}{1 + \frac{A_{\kappa} E_{\kappa}(t)}{A_{\text{жб}} E_{\text{жб}}^*(t)}}. \quad (4)$$

Кроме того, в [3] предложено разрешающее интегральное уравнение для  $\Delta\sigma_{\kappa}(t)$ :

$$\sigma_{\kappa}(t_0)L_0 - \Delta\sigma_{\kappa}(t)L_0 + \int_{t_0}^t \Delta\sigma_{\kappa}(\tau) \frac{d}{d\tau} L_1(\tau) d\tau = 0, \quad (5)$$

где:

$$L_0 = \left[ \frac{1}{E_{\kappa, \text{мэ}}} + C_{\kappa}(t, t_0) \right] - \frac{A_{\kappa}}{A_{\text{жб}}} \left[ \frac{1}{E_{\text{жб}}^*} + C_{\text{жб}}^*(t, t_0) \right], \quad (6)$$

$$L_1 = C_{\kappa}(t, t_0) + \frac{A_{\kappa}}{A_{\text{жб}}} C_{\text{жб}}^*(t, t_0), \quad (7)$$

$$C_{\kappa}(t, t_0) = C_{\text{кр}} \left[ 1 - \beta e^{-\gamma(t-t_0)} \right], \quad (8)$$

$$C_{\text{жб}}^*(t, t_0) = C_{\text{кр}}^* \left[ 1 - \beta^* e^{-\gamma^*(t-t_0)} \right]. \quad (9)$$

Уравнение (5) позволяет находить изменения напряжений во времени, что в определенной мере усложняет расчет – требует использование ЭВМ с применением соответствующей расчет-

ной программы, но тем самым делает его более точным. Из уравнения (5) следует решение в

интегральной форме:

$$\Delta\sigma_{\kappa}(t) = \frac{1}{L_0} \left[ \sigma_{\kappa}(t_0) \int_{t_0}^t L'_0 e^{-\int_{t_0}^{\tau} \frac{L'_0}{L_0} dx} d\tau + L_0(t_0) \Delta\sigma_{\kappa}(t_0) \right] e^{\int_{t_0}^t \frac{L'_0}{L_0} d\tau}. \quad (10)$$

Здесь индекс « $\kappa$ » обозначает арматуру (каната) обжатия, индекс « $жб$ » – условно однокомпонентная матрица растянутой части сечения элемента; знак « $\Delta$ » – приращение напряжений в канате после приложения обжатия  $N_{\kappa}(t_0)$ ;

$A_{\kappa}$  – площадь сечения арматуры (каната) обжатия;  $A_{жб}$  – тоже железобетонного сечения. При этом следует отметить, что в формулах (1), (2), (4) и (6)–(8) значок «\*» (звездочка), относящийся к различным параметрам, характеризует поврежденный коррозией материал.

Таким образом, рассмотрение силового сопротивления изгибаемых железобетонных элементов поврежденных коррозией, позволяет аргументировать выработанные методики определения момента трещинообразования изгибаемого железобетонного элемента, поврежденного коррозией и алгоритмы расчетной оценки влияния обжатия растянутой части сечения, поврежденного коррозией изгибаемого железобетонного элемента на момент образования трещин.

\**Научный консультант В.М. Бондаренко, д-р техн. наук, профессор, академик РААСН.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Байдин, О.В.* Тенденции физических основ коррозии бетона / О.В. Байдин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 27 – 28. – ISSN 2071-7318.

2. *Байдин, О.В.* Силовое сопротивление образованию трещин поврежденного коррозией железобетона / О.В. Байдин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2012. – № 1. – С. 11 – 14. – ISSN 2071-7318.

3. *Байдин, О.В.* К вопросу повышения трещиностойкости поврежденного коррозией железобетона / О.В. Байдин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2012. – № 1. – С. 46 – 49. – ISSN 2071-7318.

4. *Байдин, О.В.* Повышение сопротивления образованию трещин поврежденного коррозией железобетона обжатием / О.В. Байдин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 2. – ISSN 0039-2383.

5. *Бондаренко, В.М.* Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунов. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 472 с.: 182 ил. – ISBN 5-93093-279-4.

6. *Бондаренко, В.М.* Феноменология кинетики повреждений бетона железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде / В.М. Бондаренко // Бетон и железобетон. – 2008. – № 2. – С. 25 – 28. – ISSN 0005-9889.

7. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 88 с.