

Байдин О. В., канд. техн. наук, докторант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## К ВОПРОСУ ОБ ОБРАЗОВАНИИ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОНЕ ПОВРЕЖДЕННОМ КОРРОЗИЕЙ<sup>1</sup>

oleg.v31@yandex.ru

В статье рассматривается трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов поврежденных коррозией. При этом приводится метод оценки ресурса силового сопротивления образованию трещин в эксплуатируемых поврежденных коррозией изгибаемых железобетонных элементах.

**Ключевые слова:** трещиностойкость, коррозионные повреждения, изгибаемый элемент, силовое сопротивление.

Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций техногенного или природного происхождения, как государственная научная и технологическая проблема<sup>2</sup>, включает задачу обеспечения эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций, которые требуют дополнительной трещиностойкости первой категории.

Это относится к сооружениям природоохранного, коммунального, коммуникационного и специального назначения. Во время эксплуатации такие сооружения, как правило, подвергаются агрессивным воздействиям внешней среды. Чаще всего – это химические жидкие или газообразные кислото- и щелочесодержащие вещества, вызывающие коррозионные повреждения бетона и арматуры. Поэтому оценка ресурса долговременной трещиностойкости конструкции и вычисление усилий от внешних

нагрузок, вызывающих образование трещин в сечениях железобетонных конструкций, поврежденных коррозией, актуально.

В данной статье в качестве базовой рассматривается задача трещиностойкости изгибаемого железобетонного элемента.

Решение сформулированной задачи осуществляется в следующей последовательности и с помощью следующих посылок:

– считается, что к началу действия коррозионной среды конструкция воспринимает внешние нагрузки и находится в установившемся константном напряженно-деформированном состоянии, а характеристики внешней коррозионной среды неизменны во времени;

– учитывается, что развитие коррозионных повреждений существенно зависит от уровня напряжений и подчиняется обобщенному закону [4]:

$$\frac{\alpha(\Delta\delta)}{\alpha t} = -\alpha(\Delta\delta)^m; \text{ где } \Delta\delta = \frac{\delta_{sp} - \delta}{\delta_{sp}}; m = \sum_{i=0}^2 q_m \eta^i; \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\sigma_{cp}}{R}; \sigma_{cp} = \int_p^{\delta} \frac{\sigma(z) dz}{X - p}; \text{ при } m \geq 1. \quad (2)$$

Здесь:

$\delta$  – глубина фронта коррозионного повреждения;  $X$  или  $X_i$  – высота зоны сжатия (или растяжения) изгибаемого элемента;  $z$  – соответствующая ордината, отсчитываемая от оси нулевого напряжения;  $m, \alpha, \delta_{sp}$  – эмпирические параметры, зависящие от уровня расчетных средних напряжений (2), сочетания номинации бетона и свойств коррозионной среды [4];  $R_b$  – предел прочности бетона при сжатии ( $R_{bt}$  – при растяжении).

Подчеркнем, что случай  $m \geq 1$  для функции  $\delta$  отражает так называемый «затухающий»

при  $m > 1$  (2,3,4...):

$$\delta(t) = \left\{ 1 - \left[ \Delta\delta(t_0, t_0) \right]^{[(-m)+1]} \alpha [(-m)+1] \left[ t - t_0 \right]^{\frac{1}{[(-m)+1]}} \right\} \delta_{sp}. \quad (5)$$

характер продвижения повреждений, при котором повреждения стабилизируются, а самопродвижение коррозионной среды обнуляется в пределах бетонного тела (рис. 2).

$$\delta \leq X \text{ (или } \delta_i \leq X_i), \quad (3)$$

где значение (3) означает принадлежность к зоне неизменного знака напряжений (сжатия или растяжения).

Именно этот тип кинетики коррозионных повреждений и ограничивает область проводимых исследований. Это обуславливает рамки анализа и ограничивает эксплуатационные возможности сооружений и конструкций.

Решения (1) имеют запись [4] и соответствуют (рис. 2):

$$\text{при } m = 1: \delta(t) = \left[ 1 - \Delta\delta(t_0, t_0) e^{-\alpha(t-t_0)} \right] \delta_{sp}; \quad (4)$$

<sup>1</sup>Научный консультант В.М. Бондаренко, д-р техн. наук, профессор, академик РААСН.

<sup>2</sup>п. 21, перечня критических технологий РФ, утвержденного Указом Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899).

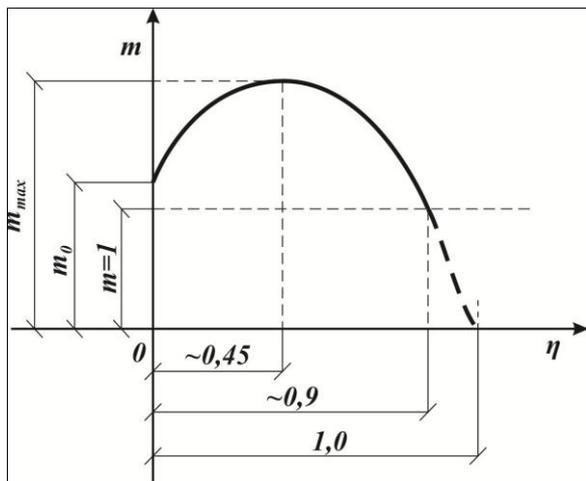


Рис. 1. График зависимости  $m$  от  $\eta$

Между тем известно, что при нагружении бетона его структура меняется [3]: вначале бетон уплотняется, его проницаемость уменьшается и, следовательно, продвижение коррозионного фронта тормозится. Это влияет на функцию  $m$  (а также на  $\alpha$  и  $\delta_{кр}$ ); график функции  $m(\eta)$  в зависимости от напряжений  $\eta$  приведен на рис. 1.

Кривая (рис. 1) аппроксимируется усеченным степенным рядом [4]:

$$m(\eta) = \sum_{i=0}^{i=2} q_{mi} \eta^i, \quad (6)$$

где:  $q_{m0} = m_0$ ;  $q_{m2} = \frac{1}{0,41} [(m_0 - m_{0,9}) + 2(m_{max} - m_0)]$ ;  $q_{m1} = \frac{1}{0,45} [(m_{max} - m_0) - 0,45^2 q_{m2}]$ . (7)

Отметим, что аналогично вычисляются значения  $\alpha(\eta)$  и  $\delta_{кр}(\eta)$ , которые учитываются, как для  $m(\eta)$ , так и для каждого сочетания номинации бетона и характеристик агрессивной среды.

В соответствии с этим принимается, что коррозионные повреждения в пределах общей толщины бетонного тела распределяют так, что на границе контакта с агрессивной средой сохранение характеристик силового сопротивления бетона является наименьшим, а на глубине  $\delta$  полностью восстанавливается (рис. 2).

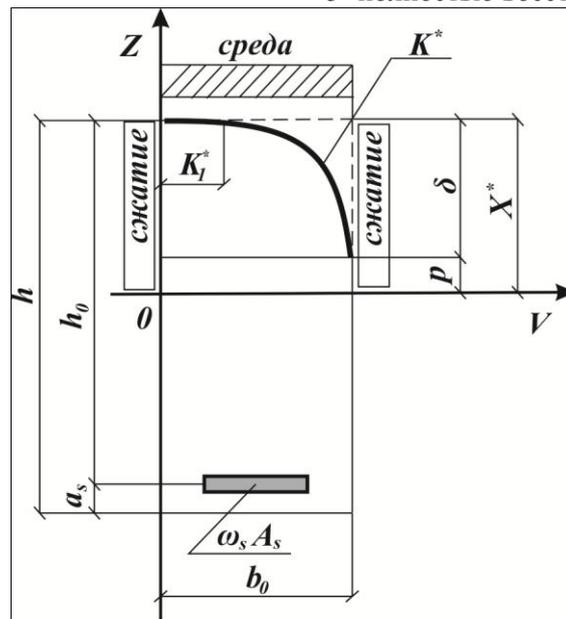


Рис. 2. Схема распределения коррозионных повреждений в сжатой зоне изгибаемого железобетонного элемента:

$h$  – общая высота сечения;  $h_0$  – рабочая высота сечения;  $a_s$  – защитный слой бетона для арматуры;

$b_0$  – ширина сечения;  $X^*$  – высота сжатой зоны;  $\delta$  – глубина коррозионных повреждений;  $p$  – толщина неповрежденного слоя бетона;  $A_s$  – площадь сечения растянутой арматуры;  $\omega_s$  – коэффициент сохранения силового сопротивления арматуры;  $K^*$  – функция (кривая) сохранения механических свойств

Функция  $K^*(z)$  принимается в виде [3]:

$$K^*(z) = \sum_{i=0}^{i=2} a_i z^i; \quad \frac{dK^*(z)}{dz} = \sum_{i=0}^{i=2} i a_i z^{i-1}, \quad (8)$$

при  $z = p$ ,  $K^*(p) = 1$ ,  $\left. \frac{dK^*(z)}{dz} \right|_{z=p} = 0$ ; (9)

при  $z = p + \delta$ ,  $K^*(p + \delta) = K_1^* < 1$ , (10)

где значения  $a_i$  находится из условий:

откуда:  $a_0 = 1 + (K_1^* - 1) \left( \frac{p}{\delta} \right)^2$ ;  $a_1 = -2(K_1^* - 1) \frac{p}{\delta^2}$ ;  $a_2 = \frac{K_1^* - 1}{\delta^2}$ . (11)

Заметим, что при  $K_1^* = 0$  будет:

$$a_0 = 1 - \left(\frac{p}{\delta}\right)^2; \quad a_1 = \frac{2p}{\delta^2}; \quad a_2 = -\frac{1}{\delta^2}. \quad (12)$$

Отмечается, что поскольку величина параметра  $m$ , зависящая от уровня действующих напряжений, переменных вдоль пролета и соответственно вдоль пролета меняется глубина повреждений  $\delta$ , проходя различные значения, максимум которых может не совпадать с максимумом изгибающих моментов, поскольку расположение опасного сечения неоправданно назначать априорно, а следует вычислять из условия максимума:

$$\frac{d}{dx} \left[ \frac{M(x)}{M_{np}^*(x)} \right] = 0. \quad (13)$$

Оценивая момент образования трещин в опасном сечении, следует отметить следующее:

- в бетоне растянутой зоны формируется прямоугольная эпюра растягивающих напряжений ( $\sigma_{\phi,t} = R_{bt}^*$ ), скорректированная влиянием коррозионных повреждений;
- в растянутой арматуре напряжения определяются из условия совместного деформирова-

ния растянутого бетона  $\varepsilon_{bt}$  и растянутой арматуры:

$$\varepsilon_{bt} = \varepsilon_s \quad \text{или} \quad \frac{R_{bt}^*}{E_{bt}^*} = \frac{\sigma_s^*}{E_s'} \quad \text{и} \quad \sigma_s^* = \frac{E_s'}{E_{bt}^*} R_{bt}^*, \quad (14)$$

где:  $E_s^*$  – временный модуль деформации поврежденной коррозией арматуры;  $E_{bt}^*$  – временный модуль деформации растянутого поврежденного коррозией бетона при  $\sigma_{\phi,t} = R_{bt}^*$ ;  $R_{bt}^*$  – предел прочности бетона на растяжение с учетом влияния коррозионных повреждений;

- в интересах получения наименьшего значения  $M_{mp,1}^*$  (для первого приближения расчета) для сжатого бетона в сжатой зоне принимается также прямоугольная эпюра нормальных напряжений сопротивления  $\sigma_b = R_b^*$  с корректировкой в зависимости от интенсивности коррозионных повреждений (рис. 3);

- аналогично напряжения в сжатой арматуре принимаются предельными  $\sigma_s' = R_s'$  (заметим, при  $z^* \geq a_s'$ , следует принимать  $\sigma_s' = 0$ ).

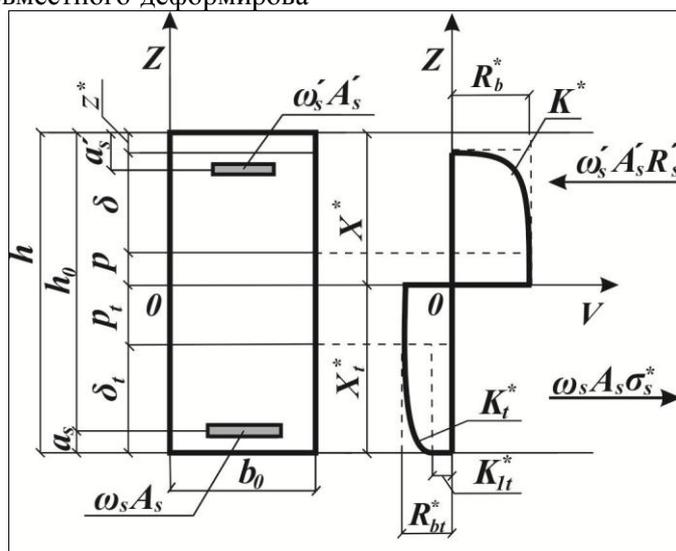


Рис. 3. Схема поперечного сечения и силового сопротивления изгибаемого элемента поврежденного коррозией в момент образования трещины:

$h$  – общая высота элемента;  $h_0$  – рабочая высота элемента;  $b_0$  – ширина сечения элемента;  $\delta$  – толщина полностью разрушенного бетона сжатой зоны;  $\delta_t$  – тоже в растянутой зоне сечения;  $p$  и  $p_t$  – соответственно толщины поврежденного коррозией бетона в сжатой и в растянутой зонах сечения;  $X^*$  и  $X_t^*$  – соответственно толщины сжатой и растянутой зон сечения;  $K_b^*$  – коэффициент сохранения силового сопротивления растянутой фибры;  $R_b^*$  и  $R_{bt}^*$  – предельные значения прочности сжатых и растянутых при изгибе фибр бетона;  $\omega_s'$  и  $\omega_s$  – коэффициент сохранения силового сопротивления арматуры

К этому отметим, что наличие сжатой арматуры, приводящее к уменьшению высоты сжатой зоны сечения  $X^*$  и увеличению высоты

растянутой зоны  $(h - X^*)$ , уменьшает жесткость железобетонной балки.

Высота сжатой зоны, вычисляемая из условия равновесия сил на горизонтальную ось [2]:

$$X^* = \frac{\omega_s A b_s - \omega'_s A'_s R'_s}{b_0 (R_b + R_{bt})} + \frac{R_b}{3(R_b + R_{bt})} \delta + \frac{R_b}{(R_b + R_{bt})} z^* - \frac{1}{3} (1 - K_{lt}^*) \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} \delta_i + \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} h. \quad (15)$$

С учетом правила сложения сопротивлений жесткость сечения элемента  $D^*$  равна сумме жесткостей всех компонентов  $D_i^*$ , отсчитываемых относительно оси, проходящей через центр тяжести приведенного сечения:

$$D^* = \sum_{i=1}^n D_i^* = \sum_{i=1}^n A_i E_i r_i^2, \quad (16)$$

где:  $r_i$  – расстояние от центра тяжести  $i$ -ого компонента до центра тяжести приведенного сечения.

Положение центра тяжести приведенного сечения относительно растянутой грани рассчитывается по формуле [2]:

$$y_{ц.т.} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i A_i E_i^*}{\sum_{i=1}^n A_i E_i^*}. \quad (17)$$

Значения  $A_i$  и  $E_i^*$  вычисляются с учетом влияния коррозионных повреждений. Это дает исходные данные для нахождения момента образования трещин (в первом приближении) и приводит к наименьшей величине момента трещинообразования  $M_{mp,1}^*$ .

С учетом [5] запишем:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{M^*}{D^*}; \quad \frac{z}{\rho} = \varepsilon^*; \quad \varepsilon_{\phi t} = \frac{h - X}{\rho}, \quad (18)$$

где:

$\rho$  – радиус кривизны;  $U$  – функция прогиба;  $x$  – абсцисса сечения;  $X$  – высота сжатой зоны;  $\varepsilon_{\phi t}$  – относительное удлинение фибрового растянутого волокна [1],

и, находим значение изгибающего момента:

$$M_{mp,1}^* = \frac{K_{lt}^* \varepsilon_{Rt}}{h - X_1^*} D^*, \quad (19)$$

где:

$M_{mp,1}^*$  – первое приближенное значение изгибающего момента, при котором в опасном сечении образуется первая трещина;  $\varepsilon_{Rt}$  – предельная относительная полная деформация при изгибе растянутого фибрового волокна;  $K_{lt}^*$  – коэффициент

сохранения силового сопротивления для фибрового растянутого волокна;  $X_1^*$  – высота сжатой зоны;  $h$  – общая высота сечения изгибаемого элемента;  $D^*$  – жесткость наиболее нагруженного сечения поврежденного коррозией изгибаемого элемента.

Отметим, что полученная величина момента трещинообразования  $M_{mp,1}^*$  (первое приближение) обеспечивает дополнительный запас трещиностойкости. Поэтому в реальных условиях для практической оценки ресурса трещиностойкости можно ограничиваться величиной  $M_{mp,1}^*$ .

При необходимости дальнейшего уточнения  $M_{mp,1}^*$  можно заменить расчетные предельные силовые характеристики сжатой зоны на те характеристики, которые следуют из  $M_{mp,1}^*$  (рис. 4).

Этот прием состоит в том, что в сжатой зоне фибровые характеристики бетона  $R_b^*$  приближенно заменяются на  $\sigma_{b,\phi}$ :

$$\sigma_{b,\phi} = \left( \frac{M_{mp,1}^*}{M_{np}^*} \right)^{\eta_\phi} R_b, \quad (\eta_\phi = 1/2), \quad (20)$$

напряжения в сжатой арматуре из условий совместимости деформаций с бетоном принимаем:

$$\sigma'_s = \frac{E'_s}{E_{b,\phi}^*} \sigma_{b,\phi}, \quad (21)$$

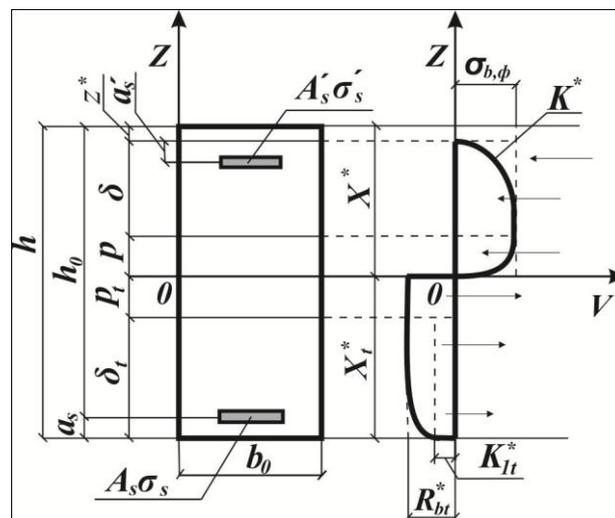


Рис. 4. Схема поперечного сечения и силового сопротивления образований трещин изгибаемого элемента поврежденного коррозией для второго приближения

причем при  $z^* \geq a'_s$  напряжении  $\sigma'_s$  считаем нулевым  $\sigma'_s = 0$ , и далее повторно применяется алгоритм (13)–(21).

Таким образом, построен метод оценки ресурса силового сопротивления образования трещин, в поврежденных коррозией изгибаемых железобетонных элементах находящихся в условиях эксплуатации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Байдин, О.В. Трещиностойкость стержневых сборно-монолитных железобетонных конструкций / О.В. Байдин. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – 101 с. – ISSN 978-5-361-00147-7.
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. Бондаренко, В.М. Некоторые фундаментальные вопросы развития теории железобетона / В.М. Бондаренко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – № 2. – С. 5 – 11. – ISSN 0039-2383.
4. 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.
5. Феодосьев, А.И. Сопротивление материалов / А.И. Феодосьев. – М.: Изд-во Наука, Физматгиз, 1970.