

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

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПОВРЕЖДЕННОГО КОРРОЗИЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА*

Oleg.v31@yandex.ru

Рассмотрено влияние обжатия железобетона на повышение сопротивления образованию трещин у эксплуатируемых и поврежденных коррозией железобетонных элементов.

Ключевые слова: обжатие железобетона, коррозионные повреждения, трещинообразование.

В настоящей работе изучается возможность предотвращения трещин у поврежденных коррозией железобетонных конструкций с помощью обжатия. При этом повышение сопротивления образованию силовых трещин эксплуатируемого, поврежденного коррозией железобетонного элемента осуществляется за счет обжатия его растянутой части сечения. Обжатие выполняется натяжением «на бетон» дополнительным внешним армированием (канатами). Таким

образом, в расчетную схему вводится внешняя сила N_k и меняется напряженно-деформируемое состояние железобетонного элемента. Сила каната N_k определяется по следующей формуле:

$$N_k = A_k \sigma_k \quad (1)$$

По аналогии с работой [2], рассматриваются два варианта коррозионного повреждения железобетонного изгибаемого элемента (рис.1).

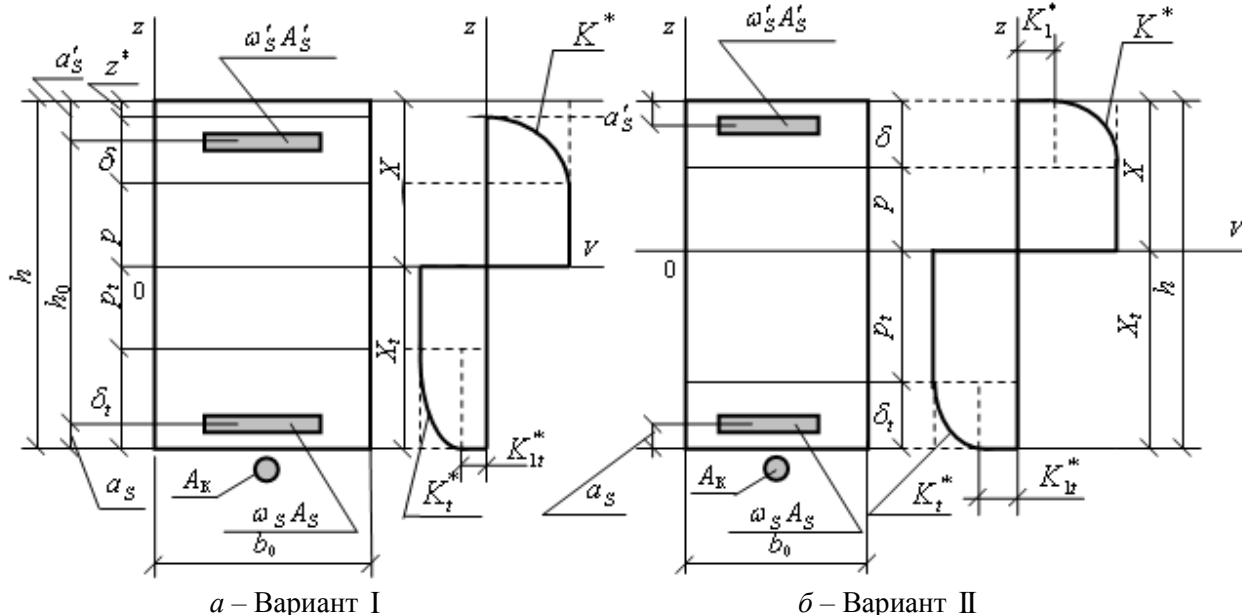


Рис. 1. Схемы поперечных сечений и эпюры повреждений бетона изгибаемого бруса:

a – вариант I, $z^* > 0$; б – вариант II, $z^* = 0$

Вследствие обжатия растянутой части сечения, поврежденного коррозией изгибаемого железобетонного бруса, меняется его напряженно-деформируемое состояние; жесткость арматуры (каната) обжатия считается нулевой в поперечном направлении; вместе с тем, обжатие растянутой части сечения силой N_k (1) увеличивает толщину сжатой зоны X и уменьшает толщину растянутой зоны $X_t = h - X$.

Аналогично работе [2], из условия равновесия всех сил на горизонтальную ось с добавлением внешней силы обжатия N_k (1), находится толщина сжатого сечения X (или высота растянутой части сечения $h - X$) в момент образования трещины при $\epsilon_{ft} = \epsilon_{Rt}$:

а) для варианта I:

$$X = \frac{\omega_s A_s R_s - \omega'_s A'_s R'_s + \sigma_k A_k}{b(R_b + R_{bt})} + \frac{1}{3} \left(\frac{R_b}{(R_b + R_{bt})} \right) \delta + \frac{R_b}{(R_b + R_{bt})} z^* - \frac{1}{3} (1 - K_{lt}^*) \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} \delta_t + \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} h, \quad (2)$$

б) для варианта II:

$$X = \frac{\omega_s A_s R_s - \omega'_s A'_s R'_s + \sigma_\kappa A_\kappa}{b(R_b + R_{bt})} + (1 - K_1^*) \frac{R_b}{(R_b + R_{bt})} \delta - \frac{1}{3} (1 - K_{1r}^*) \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} \delta_r + \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} h. \quad (3)$$

Оценка обжатия производится с учетом ползучести бетона и релаксации напряжений в арматуре. В данном случае считаем, что коррозионные повреждения бетона и арматуры к времени обжатия стабилизируются; повреждения учитываются для арматуры коэффициентом ω_s (уменьшения расчетной площади поперечного сечения арматуры), а для бетона с помощью формулы сохранения характеристики силового сопротивления K^* [5]:

$$K^*(\delta, z) = \sum_{i=0}^2 a_i (\delta) z^i, \quad (4)$$

при $a_0 = 1 + (K_1^* - 1) \cdot \left(\frac{p}{\delta}\right)^2$; $a_1 = -2(K_1^* - 1) \frac{p}{\delta^2}$;

$$a_2 = \frac{K_1^* - 1}{\delta^2},$$

где K_1^* – значение функции сохранения характеристик бетона на поверхности контакта между агрессивной средой и бетоном; δ – глубина коррозионных повреждений [6]; z – ордината повреждений; p – толщина неповрежденного слоя.

$$\delta(t, t_0) = [1 - \Delta \delta(t_0) e^{-\alpha(t-t_0)}] \delta_{кр}(t_0), \quad (5)$$

здесь t_0, t – время начала коррозионных повреждений, время стабилизации повреждений.

Принимается, что к моменту исчерпания силового сопротивления образованию трещин

$$\bar{E}_{мэ} = \frac{\sum E_{мэ,i} A_i}{\sum A_i}; \bar{C} = \frac{\sum C_i A_i}{\sum A_i}; \bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i A_i}{\sum A_i}; \bar{\beta} = \frac{\sum \beta_i A_i}{\sum A_i}; \bar{\gamma} = \frac{\sum \gamma_i A_i}{\sum A_i}, \quad (9)$$

где A_i – площадь компонента (например, для арматуры растянутой зоны $A_s^* = \omega_s A_s$, для бетона растянутой зоны $A_b = b_0(h - X)$); γ_i – эмпирический параметр ползучести; β_i – тоже для $t = t_0$; X – высота сжатой части бетонного сечения; b_0, h – ширина и высота поперечного сечения.

Существенно, что во времени вследствие ползучести бетона (железобетона) и релаксации напряжений в арматуре (канате) обжатия имеют место потери усилий и, следовательно, напряженно-деформируемое состояние меняется (в частности высота сжатой части сечения уменьшается). Совокупно это повышает опасность трещинообразования.

напряжения в бетоне растянутой части сечения очерчиваются прямоугольником [1], а реологические уравнения для бетона и арматуры имеют вид:

$$\varepsilon(t_0, t) = \frac{\sigma(t)}{E_{мэ}^*} + \sigma(t) C^*(t, t) - \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{d}{d\tau} C^*(\tau, t) d\tau, \quad (6)$$

при $C^*(\tau, t) = C_{кр}^* \left[1 - \beta^* e^{-\gamma^*(t-\tau)} \right], \quad (7)$

где ε – полные относительные деформации; σ – напряжения; $E_{мэ}^*$ – модуль упруго-мгновенных деформаций поврежденного материала; C^* – мера простой ползучести для поврежденного коррозией материала; $C_{кр}^*, \beta^*, \gamma^*$ – эмпирические параметры.

Признается, что функция K^* в равной мере относится ко всем характеристикам поврежденного коррозией материала:

$$K^* = \frac{R^*}{R} = \frac{E^*}{E} = \frac{C^0}{C^*} = \dots, \quad (8)$$

где значок (верхний индекс) – 0 («нолик») относится к характеристикам исходного материала, а значок (верхний индекс) – * («звездочка») – к характеристикам поврежденного материала; R – предел прочности; E – модуль деформации; C – мера простой ползучести.

Расчетные характеристики для частей сечения с разными компонентами устанавливаются как средневзвешенные:

Потери обжатия железобетонного элемента определяются количественно, способом предлагаемым ниже.

При этом следует отметить:

– учет силового сопротивления растянутой арматуры и бетона растянутой зоны осуществляется условным железобетонным элементом, характеристики которого находятся как средневзвешенные (9) с последующей записью типа (6), (7);

– повторим, что при этом влияние коррозионных повреждений для арматуры вводится коэффициентом сохранения ω_s к площади сечения, а для бетона коэффициентом сохранения характеристик (8), (4)

$$K_{мб}^* = 2/3 (K_{\max}^* - K_{\min}^*); \quad (10)$$

– текущее обжатие рассчитывается по формуле:

$$N_{\kappa}(t) = N_{\kappa}(t_0) - \Delta N_{\kappa}(t)$$

или

$$\sigma_{\kappa}(t) = \sigma_{\kappa}(t_0) - \Delta \sigma_{\kappa}(t); \quad (11)$$

– условие равновесия:

$$N_{\kappa}(t) - N_{\text{жб}}(t) = 0 \text{ или } \sigma_{\kappa}(t)A_{\kappa} - \sigma_{\text{жб}}(t)A_{\text{жб}}, \quad (12)$$

$$\text{отсюда следует } \sigma_{\text{жб}}(t) = \sigma_{\kappa}(t) \frac{A_{\kappa}}{A_{\text{жб}}}; \quad (13)$$

– условие совместности деформации:

$$\varepsilon_{\kappa}(t) = \varepsilon_{\text{жб}}(t); \quad (14)$$

– реологические уравнения для $\varepsilon(t)$ имеют вид (6):

$$\varepsilon_{\kappa}(t) = \frac{\sigma_{\kappa}(t)}{E_{\kappa, \text{мэ}}} + \sigma_{\kappa}(t)C_{\kappa}(t, t) - \int_{t_0}^t \sigma_{\kappa}(\tau) \frac{d}{d\tau} C_{\kappa}(\tau, t) d\tau, \quad (15)$$

$$\varepsilon_{\text{жб}}(t) = \frac{\sigma_{\text{жб}}(t)}{E_{\text{жб}, \text{мэ}}^*} + \sigma_{\text{жб}}(t)C_{\text{жб}}^*(t, t) - \int_{t_0}^t \sigma_{\text{жб}}(\tau) \frac{d}{d\tau} C_{\text{жб}}^*(\tau, t) d\tau. \quad (16)$$

Совместное использование (10)–(16) и последующие группировки дают разрешающие интегральные уравнения для $\Delta \sigma_{\kappa}(t)$:

$$\sigma_{\kappa}(t_0)L_0 - \Delta \sigma_{\kappa}(t)L_0 + \int_{t_0}^t \Delta \sigma_{\kappa}(\tau) \frac{d}{d\tau} L_1(\tau, t) d\tau = 0, \quad (17)$$

$$\text{где: } L_0 = \left[\frac{1}{E_{\kappa, \text{мэ}}} + C_{\kappa}(t, t_0) \right] - \frac{A_{\kappa}}{A_{\text{жб}}} \left[\frac{1}{E_{\text{жб}}^*} + C_{\text{жб}}^*(t, t_0) \right], \quad (18)$$

$$L_1 = C_{\kappa}(\tau, t_0) + \frac{A_{\kappa}}{A_{\text{жб}}} C_{\text{жб}}^*(\tau, t_0). \quad (19)$$

Приведем расшифровку основных обозначений: индекс « κ » обозначает арматуру (каната) обжатия; индекс «жб» – условно однокомпонентная матрица растянутой части сечения элемента; знак « Δ » – приращение напряжений в канате после приложения обжатия $N_{\kappa}(t_0)$; A_{κ} – площадь сечения арматуры (каната) обжатия; $A_{\text{жб}}$ – тоже железобетонного сечения.

Решение уравнения (17) позволяет найти искомое приращение $\Delta \sigma_{\kappa}(t)$, равное потерям обжатия за счет ползучести материалов и релаксации напряжений в арматуре (канате) обжатия. Аналогичная задача решается в [1] где потери усилия (напряжений) обжатия могут быть вычислены по действующим регламентным документам для преднапряженных конструкций с корректировкой, учитывающей влияния коррозии арматуры и бетона элемента.

Далее, аналогично работе [2], определяем центр тяжести приведенного сечения изгибаемого бруса $y_{ц.м.}$, отсчитываемого относительно растянутой грани (или любой другой точки отчета):

$$y_{ц.м.} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i A_i E_i}{\sum_{i=1}^n A_i E_i}, \quad (20)$$

и изгибную жесткость опасного сечения:

$$D^* = \sum_{i=1}^n D_i^* = \sum_{i=1}^n A_i E_i r_i^2, \quad (21)$$

где E_i – линейный временный модуль деформации i – го компонента [4]:

$$E_{\text{вр.л.}i}^* = \left[\frac{1}{E_{\text{мэ},i}^*} + C_i^*(t, t) - \int_{t_0}^t \frac{\sigma_i(\tau)}{\sigma_i(t)} \frac{d}{d\tau} C_i^*(\tau, t) d\tau \right]^{-1}, \quad (22)$$

причем, $\sigma_i(t)$ можно получить аппроксимацией в процессе последовательных приближений (11)–(19); r_i – расстояния от центра тяжести i -го компонента до центра тяжести приведенного сечения, согласно [2] и с учетом (2), (3); A_i – площади компонентов с учетом найденного значения высоты сжатой зоны X (2), (3), следуя (10)–(19).

Далее, в соответствии с работой [2]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2U}{dx^2} = \frac{M}{D^*}, \quad \varepsilon = \frac{z}{\rho}, \quad \varepsilon_{\phi t} = \frac{h-X}{\rho}, \quad (23)$$

где ρ – радиус кривизны деформируемого бруса; U – функция прогиба бруса; x – абсцисса сечения, X – высота сжатой зоны; $\varepsilon_{\phi t}$ – относительное удлинение фибрового растянутого волокна [3].

Следовательно, изгибающий момент соответствующий образованию трещин, вычисляется с учетом исходного обжатия и всех его потерь за счет ползучести и релаксации, коррозионных повреждений (8), (9):

$$M_{mp} = \frac{K_{lt}^* \varepsilon_{Rt}^*}{h-X} D^*, \quad \text{при } \varepsilon_{Rt}^* = K_{lt}^* \varepsilon_{Rt} \quad (24)$$

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

Таким образом, предложена расчетная оценка влияния обжатия растянутой части сечения, поврежденного коррозией изгибаемого железобетонного бруса на момент образования трещин, что позволяет обеспечить заданное повышение трещиностойкости железобетонных конструкций поврежденных коррозией.

**Научный консультант д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук. В.М. Бондаренко.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аванесов, М.П. Теория силового сопротивления железобетона. Под ред. В.М. Бондаренко / М.П. Аванесов, В.М. Бондаренко, В.И. Римшин. – Барнаул, Изд-во АлтГТУ, 1996. – 169 с.
2. Байдин, О.В. Силовое сопротивление образованию трещин поврежденного коррозией железобетона / О.В. Байдин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2012. – № 1.
3. 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.
4. Бондаренко, В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона / В.М. Бондаренко. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1968. – 234 с.
5. Бондаренко, В.М. Некоторые фундаментальные вопросы развития теории железобетона / В.М. Бондаренко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – № 2. – С. 5 – 11.
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.