

**ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ
ПОВРЕЖДЕННОГО КОРРОЗИЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ОБЖАТИЕМ
С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ***

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

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46*

Приведена методика количественной оценки влияния обжатия железобетона на повышение сопротивления образованию трещин у поврежденных коррозией железобетонных элементов. При этом учитывается уровень потерь предварительного напряжения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: силовое сопротивление, обжатие железобетона, коррозионные повреждения, потери обжатия.

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

В статье приводится обобщение и развитие исследований [1, 2] по повышению трещиностойкости железобетонных конструкций поврежденных коррозией с помощью обжатия. При этом учитывается влияние неравновесных процессов силового сопротивления железобетона на потери обжатия, рассмотренное в работе [3]. Обжатие оценивается 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]:

$$K^*(\delta, z) = \sum_{i=0}^2 a_i(\delta) z^i, \quad (1)$$

$$\text{при } a_0 = 1 + (K_1^* - 1) \cdot \left(\frac{p}{\delta}\right)^2; \quad a_1 = -2(K_1^* - 1) \frac{p}{\delta^2}; \quad a_2 = \frac{K_1^* - 1}{\delta^2}, \quad (2)$$

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

$$\delta(t, t_0) = [1 - \Delta \delta(t_0) e^{-\alpha(t-t_0)}] \delta_{кр}(t_0), \quad (3)$$

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

Принимается, что к моменту исчерпания силового сопротивления образованию трещин напряжения в бетоне растянутой части сечения очерчиваются прямоугольником, а реологические уравнения для бетона и арматуры имеют вид:

$$\varepsilon(t_0, t) = \frac{\sigma(t)}{E_{ме}^*} + \sigma(t) C^*(t, t) - \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{d}{d\tau} C^*(\tau, t) d\tau, \quad (4)$$

$$\text{при } C^*(\tau, t) = C_{кр}^* \left[1 - \beta^* e^{-\gamma^*(t-\tau)} \right], \quad (5)$$

где ε – полные относительные деформации; σ – напряжения; $E_{ме}^*$ – 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:

$$K^* = \frac{R^*}{R} = \frac{E^*}{E} = \frac{C^0}{C^*} = \dots, \quad (6)$$

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:

$$\bar{E} = \frac{\sum E_i A_i}{\sum A_i}; \quad \bar{C} = \frac{\sum C_i A_i}{\sum A_i}; \quad \bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i A_i}{\sum A_i}; \quad \bar{\beta} = \frac{\sum \beta_i A_i}{\sum A_i}; \quad \bar{\gamma} = \frac{\sum \gamma_i A_i}{\sum A_i}, \quad (7)$$

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.

Схемы коррозионных повреждений сжатого бетонного образца приведены на рис 1.

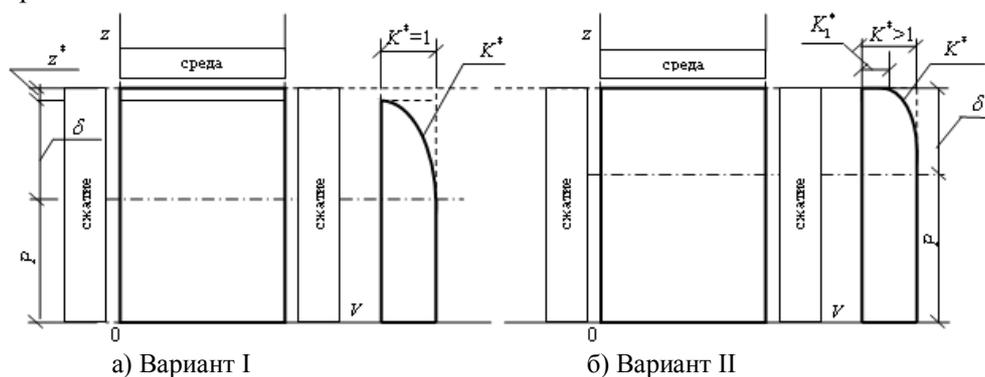


Рис. 1. Схемы коррозионных повреждений сжатого бетонного образца:
 а) вариант I, $z^* > 0$ (полного разрушения контактного с агрессивной средой слоя);
 б) вариант II, $z^* = 0$ (фибровые волокна сохраняют часть прежнего силового сопротивления)

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). При этом в расчетную схему вводится внешняя сила N_k и меняется напряженно-деформируемое состояние железобетонного элемента. Внешняя сила каната N_k определяется по формуле:

$$N_k = A_k \sigma_k \quad (8)$$

По аналогии с работой [4], рассматриваются два варианта коррозионного повреждения железобетонного изгибаемого элемента (рис.2).

Вследствие обжатия растянутой части сечения, поврежденного коррозией изгибаемого железобетонного бруса, меняет его напряженно-деформируемое состояние; жесткость арматуры (каната) обжатия считается нулевой в поперечном направлении; вместе с тем, обжатие растянутой части сечения силой N_k (8) увеличивает толщину сжатой зоны X и уменьшает толщину растянутой зоны $X_t = h - X$.

Аналогично работе [4], из условия равновесия всех сил на горизонтальную ось с добавлением внешней силы обжатия N_k (8), находится толщина сжатого сечения X (или высота растянутой части сечения $h - X$) в момент образования трещины при $\varepsilon_{ft} = \varepsilon_{Rt}$:

а) для варианта I:

$$X = \frac{\omega_S A_S R_S - \omega'_S A'_S R'_S + \sigma_\kappa A_\kappa}{b(R_b + R_{bt})} + \frac{1}{3} \left(\frac{R_b}{(R_b + R_{bt})} \right) \delta + \frac{R_b}{(R_b + R_{bt})} z^* - \frac{1}{3} (1 - K_{lt}^*) \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} \delta_t + \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} h, \quad (9)$$

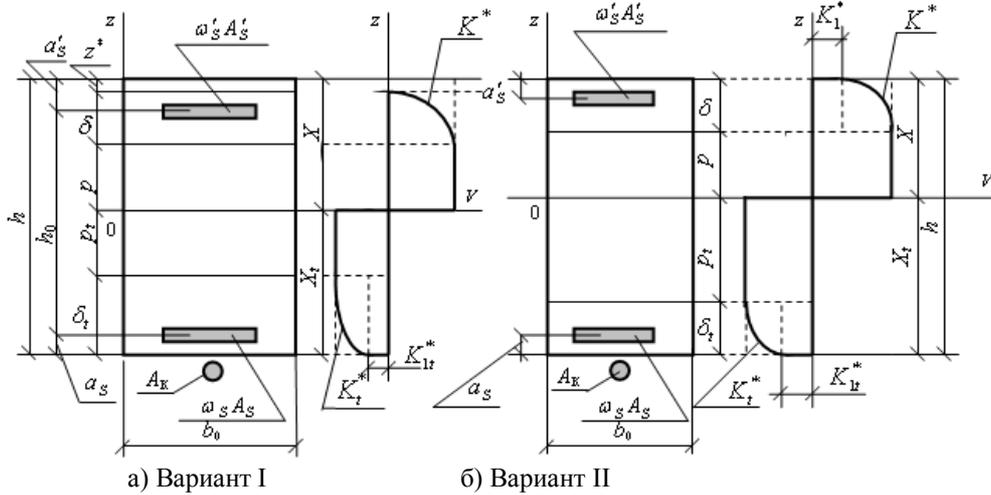


Рис. 2. Схемы поперечных сечений и эпюры повреждений бетона изгибаемого бруса:

а) вариант, $z^* > 0$; б) вариант, $z^* = 0$

б) для варианта II:

$$X = \frac{\omega_S A_S R_S - \omega'_S A'_S R'_S + \sigma_\kappa A_\kappa}{b(R_b + R_{bt})} + (1 - K_{lt}^*) \frac{R_b}{(R_b + R_{bt})} \delta - \frac{1}{3} (1 - K_{lt}^*) \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} \delta_t + \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} h. \quad (10)$$

При этом 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.

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 (7) с последующей записью типа (4) и (5);

– повторим, что при этом влияние коррозионных повреждений для арматуры вводится коэффициентом сохранения ω_s к площади сечения, а для бетона коэффициентом сохранения характеристик (6), (1)

$$K_{жсб}^* = 2/3 (K_{\max}^* - K_{\min}^*); \quad (11)$$

– текущее обжатие рассчитывается по формуле:

$$N_\kappa(t) = N_\kappa(t_0) - \Delta N_\kappa(t) \text{ или } \sigma_\kappa(t) = \sigma_\kappa(t_0) - \Delta \sigma_\kappa(t); \quad (12)$$

– условие равновесия:

$$N_K(t) - N_{жсб}(t) = 0 \text{ или } \sigma_K(t)A_K - \sigma_{жсб}(t)A_{жсб}, \quad (13)$$

отсюда следует
$$\sigma_{жсб}(t) = \sigma_K(t) \frac{A_K}{A_{жсб}}; \quad (14)$$

– условие совместности деформации:

$$\varepsilon_K(t) = \varepsilon_{жсб}(t); \quad (15)$$

– реологические уравнения для $\varepsilon(t)$ имеют вид (4):

$$\varepsilon_K(t) = \frac{\sigma_K(t)}{E_{K,мг}} + \sigma_K(t)C_K(t,t) - \int_{t_0}^t \sigma_K(\tau) \frac{d}{d\tau} C_K(\tau,t) d\tau, \quad (16)$$

$$\varepsilon_{жсб}(t) = \frac{\sigma_{жсб}(t)}{E_{жсб,мг}^*} + \sigma_{жсб}(t)C_{жсб}^*(t,t) - \int_{t_0}^t \sigma_{жсб}(\tau) \frac{d}{d\tau} C_{жсб}^*(\tau,t) d\tau. \quad (17)$$

Совместное использование (11)–(17) и последующие группировки дают разрешающие интегральные уравнения для $\Delta\sigma_K(t)$:

$$\sigma_K(t_0)L_0 - \Delta\sigma_K(t)L_0 + \int_{t_0}^t \Delta\sigma_K(\tau) \frac{d}{d\tau} L_1(\tau) d\tau = 0, \quad (18)$$

где:
$$L_0 = \left[\frac{1}{E_{K,мг}} + C_K(t,t_0) \right] - \frac{A_K}{A_{жсб}} \left[\frac{1}{E_{жсб}^*} + C_{жсб}^*(t,t_0) \right], \quad (19)$$

$$L_1 = C_K(t,t_0) + \frac{A_K}{A_{жсб}} C_{жсб}^*(t,t_0). \quad (20)$$

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

Заметим, что в формулах статьи, значок «*» (звездочка) относящийся к различным параметрам, характеризует поврежденный коррозией материал, в нашем случае это относится к железобетону, а арматура (канат) не поврежден.

Выражение (18) необходимо для вычисления изменяющихся во времени напряжений обжатия в канате $\Delta\sigma_K(t)$, т.е. определении потерь уровня обжатия железобетонного элемента поврежденного коррозией для обеспечения заданной трещиностойкости эксплуатируемых конструкций.

Решение уравнения (18) позволяет найти искомое приращение $\Delta\sigma_K(t)$, равное потерям обжатия за счет ползучести материалов и релаксации напряжений в арматуре (канате) обжатия. При этом, согласно (5), соответственно для каната и железобетона запишем:

$$C_K(t,t_0) = C_{кр} \left[1 - \beta e^{-\gamma(t-t_0)} \right], \quad (21)$$

$$C_{жсб}^*(t,t_0) = C_{кр}^* \left[1 - \beta^* e^{-\gamma^*(t-t_0)} \right]. \quad (22)$$

Далее интегральное уравнение (18) продифференцируем по t и запишем в следующем виде:

$$\Delta' \sigma_{\kappa}(t) + \frac{L'_0 - L'_1}{L_0} \Delta \sigma_{\kappa}(t) = \sigma_{\kappa}(t_0) \frac{L'_0}{L_0}, \quad (23)$$

откуда получим решение в интегральной форме:

$$\Delta \sigma_{\kappa}(t) = \frac{1}{L_0} \left[\sigma_{\kappa}(t_0) \int_{t_0}^t L'_0 e^{-\int_{t_0}^{\tau} \frac{L'_1}{L_0} dx} d\tau + L_0(t_0) \Delta \sigma_{\kappa}(t_0) \right] e^{\int_{t_0}^t \frac{L'_1}{L_0} d\tau}. \quad (24)$$

Решение (24) позволяет учитывать изменение во времени напряжений обжатия при повышении трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов поврежденных коррозией. Данное решение может быть численно реализовано с помощью ЭВМ или с помощью оценок, рассмотренных в работе [3].

Далее, аналогично работе [4], определяем центр тяжести приведенного сечения изгибаемого бруса $y_{у.м.}$, отсчитываемого относительно растянутой грани (или любой другой точки отчета):

$$y_{у.м.} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i A_i E_i}{\sum_{i=1}^n A_i E_i}, \quad (25)$$

и изгибную жесткость опасного сечения:

$$D^* = \sum_{i=1}^n D_i^* = \sum_{i=1}^n A_i E_i r_i^2, \quad (26)$$

где E_i – линейный временный модуль деформации i – го компонента [7]:

$$E_{вр.л.,i}^* = \left[\frac{1}{E_{мз,i}^*} + C_i^*(t,t) - \int_{t_0}^t \frac{\sigma_i(\tau)}{\sigma_i(t)} \frac{d}{d\tau} C_i^*(\tau,t) d\tau \right]^{-1}, \quad (27)$$

причем, $\sigma_i(t)$ можно получить аппроксимацией в процессе последовательных приближений (12)–(20); r_i – расстояния от центра тяжести i – го компонента до центра тяжести приведенного сечения [4] с учетом (9), (10); A_i – площади компонентов с учетом найденного значения высоты сжатой зоны X (9)–(20).

Далее, следуя работе [4]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{M}{D^*}, \quad \varepsilon = \frac{z}{\rho}, \quad \varepsilon_{\phi t} = \frac{h - X}{\rho}, \quad (28)$$

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.

Следовательно, изгибающий момент соответствующий образованию трещин, вычисляется с учетом исходного обжатия и всех его потерь за счет ползучести и релаксации, коррозионных повреждений (6), (7):

$$M_{mp} = \frac{K_{1t}^* \varepsilon_{Rt}}{h - X} D^*, \quad \text{при } \varepsilon_{Rt}^* = K_{1t}^* \varepsilon_{Rt}, \quad (29)$$

где M_{mp} – изгибающий момент, при котором образуется первая трещина; K_{1t}^* – коэффициент силового сопротивления для фибрового растянутого волокна; ε_{Rt} – предельная относительная деформация для фибрового растянутого волокна при изгибе (относительная полная деформация при изгибе, нормируется рег-

ламентными 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. При этом учитывается изменение во времени напряжений обжатия, что дает возможность рассчитать уровень потерь обжатия железобетона.

Л и т е р а т у р а

1. *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.

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

3. *Байдин, О.В.* Влияние неравновесных процессов силового сопротивления на потери обжатия при повышении трещиностойкости железобетона / О.В. Байдин, Г.М. Редькин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2012. – № 2. – ISSN 2071-7318.

4. *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.

5. *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.

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. *Бондаренко, В.М.* Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона / В.М. Бондаренко. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1968. – 234 с.

CRACK GROWTH RESISTANCE INCREASE OF REINFORCED CONCRETE DAMAGED BY CORROSION WITH REDUCTION OF PRESTRESSING

O.V. Baydin

The method of quantity estimation of influence of reinforced concrete reduction on increase of resistance to crack formation of reinforced elements, damaged by corrosion is presented. The level of prestressing is taken into consideration also.

KEY WORDS: power resistance, reinforced concrete reduction, corrosion damages, losses of reduction.

