

## ЭКСПОЗИЦИЯ ОБЖАТИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОВРЕЖДЕННЫХ КОРРОЗИЕЙ\*

Oleg.v31@yandex.ru

В работе рассматривается предотвращение образования трещин в железобетонных изгибаемых конструкциях, поврежденных коррозией, с помощью обжатия с учетом ползучести бетона и релаксации напряжений арматуры (канатов). При этом эффективность обжатия оценивается временем, в течение которого обеспечивается трещиностойкость железобетона, определяемым периодом эксплуатации конструкции.

**Ключевые слова:** обжатие, трещиностойкость железобетона, коррозионные повреждения.

Предотвращение образования трещин в железобетонных изгибаемых конструкциях обеспечивается обжатием растянутой зоны [1, 2]. Однако, учитывая ползучесть бетона и связанные с этим деформативность растянутой зоны, целесообразно выбирать такое усилие обжатия, которое гарантировало трещиностойкость в течение расчетного времени эксплуатации. Задачу потерь обжатия с учетом ползучести бетона и арматуры (релаксационная задача) необходимо оценить временем, в течение которого обеспечивается трещиностойкость, с тем, чтобы продолжительность этого времени определялась периодом эксплуатации конструкции.

Другими словами, важно, что во времени вследствие ползучести бетона и релаксации напряжений канатов обжатия имеют место потери усилий и, следовательно, напряженно-деформируемое состояние меняется. В связи с этим повышается опасность трещинообразования. Таким образом ставится вопрос об экспозиции эффективного обжатия.

Далее приводится расчетная оценка изменений во времени напряжений обжатия в изгибаемых железобетонных элементах поврежденных коррозией с учетом неравновесных процессов силового сопротивления железобетона [3].

В работе приняты следующие допущения:

- принимается квазилинейное уравнение и для бетона и для канатов;
- предполагается справедливость суммирования напряжений растяжения от внешней нагрузки и напряжений обжатия;

$$\varepsilon_{жб}(t) = \frac{\sigma_{жб}(t)}{E_{жб,мг}^*} + \sigma_{жб}(t)C_{жб}^*(t,t) - \int_{t_0}^t \sigma_{жб}(\tau) \frac{d}{d\tau} C_{жб}^*(\tau,t) d\tau. \quad (7)$$

Использование (1)–(7) и последующие группировки дают разрешающие интегральные уравнения для  $\Delta\sigma_{жб}(t)$ :

$$\sigma_{жб}(t_0)L_0 - \Delta\sigma_{жб}(t)L_0 + \int_{t_0}^t \Delta\sigma_{жб}(\tau) \frac{d}{d\tau} L_1(\tau,t) d\tau = 0, \quad (8)$$

где:

$$L_0 = \left[ \frac{1}{E_{жб,мг}} + C_{жб}(t,t_0) \right] - \frac{A_{жб}}{A_{жб}} \left[ \frac{1}{E_{жб}^*} + C_{жб}^*(t,t_0) \right], \quad (9)$$

– учет силового сопротивления растянутой арматуры и бетона растянутой зоны осуществляется условным железобетонным элементом, характеристики которого находятся как средне-взвешенные;

– влияние коррозионных повреждений для арматуры вводится коэффициентом сохранения  $\omega_s$  к площади сечения, а для бетона – коэффициентом сохранения характеристик, т.е. определяется как среднее по высоте растянутой зоны:

$$\bar{K}^* = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \sum_{i=0}^2 a_i z^i dz; \quad (1)$$

– текущее обжатие рассчитывается по формуле:

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

или

$$\sigma_{жб}(t) = \sigma_{жб}(t_0) - \Delta\sigma_{жб}(t); \quad (2)$$

– условие равновесия:

$$N_{жб}(t) - N_{жб}(t) = 0$$

или

$$\sigma_{жб}(t)A_{жб} - \sigma_{жб}(t)A_{жб} = 0, \quad (3)$$

отсюда следует

$$\sigma_{жб}(t) = \sigma_{жб}(t) \frac{A_{жб}}{A_{жб}}; \quad (4)$$

– условие совместности деформации:

$$\varepsilon_{жб}(t) = \varepsilon_{жб}(t); \quad (5)$$

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

$$\varepsilon_{жб}(t) = \frac{\sigma_{жб}(t)}{E_{жб,мг}} + \sigma_{жб}(t)C_{жб}(t,t) - \int_{t_0}^t \sigma_{жб}(\tau) \frac{d}{d\tau} C_{жб}(\tau,t) d\tau, \quad (6)$$

$$L_1 = C_{жб}(t,t_0) + \frac{A_{жб}}{A_{жб}} C_{жб}^*(t,t_0), \quad (10)$$

В работе приняты основные обозначения: индекс «жб» обозначает канаты обжатия; индекс «жб» – условно однокомпонентная матрица растянутой части сечения элемента; знак « $\Delta$ » – приращение напряжений в канате после приложения обжатия  $N_{жб}(t_0)$ ;  $A_{жб}$  – площадь сечения

канатов обжатия;  $A_{жб}$  – тоже железобетонного сечения.

Решение уравнения (8) позволяет найти искомого приращение  $\Delta\sigma_{\kappa}(t)$ , равное потерям обжатия за счет ползучести материалов и релаксации напряжений канатов обжатия. При этом, соответственно для каната и железобетона запишем:

$$C_{\kappa}(t, t_0) = C_{кр} \left[ 1 - \beta e^{-\gamma(t-t_0)} \right], \quad (11)$$

$$\Delta\sigma_{\kappa}(t) = \frac{1}{L_0} \left[ \sigma_{\kappa}(t_0) \int_{t_0}^t L'_0 e^{-\int_{t_0}^{\tau} \frac{L'_1}{L_0} dx} d\tau + L_0(t_0) \Delta\sigma_{\kappa}(t_0) \right] e^{\int_{t_0}^t \frac{L'_1}{L_0} d\tau}. \quad (14)$$

Решения интегрального уравнения (14), в котором учитывается изменение во времени напряжений обжатия при повышении трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов поврежденных коррозией получен в [2].

В реальном случае напряжения обжатия уменьшаются во времени, чему соответствует запись (14), в интересах практического применения и в запас учета потерь предварительного обжатия, используя [5], получаем:

$$\varepsilon(t, t_0) = \frac{\sigma(t)}{E_{мз}^*} + \sigma(t) C^*(t, t_0), \quad (15)$$

и, соответственно, временные модули деформаций для канатов обжатия:

$$E_{\kappa}(t) = \frac{E_{\kappa, мз}(t)}{1 + E_{\kappa, мз}(t) C_{\kappa}(t, t_0)}, \quad (16)$$

и расчетного железобетонного сечения:

$$\sigma_{\kappa}(t) \frac{E_{жб}^*(t) A_{жб} - E_{\kappa}(t) A_{\kappa}}{E_{\kappa}(t) E_{жб}^*(t) A_{жб}} = \sigma_{\kappa}(t_0) \frac{E_{жб}^*(t_0) A_{жб} - E_{\kappa}(t_0) A_{\kappa}}{E_{\kappa}(t_0) E_{жб}^*(t_0) A_{жб}}. \quad (19)$$

Откуда:

$$\frac{\sigma_{\kappa}(t)}{\sigma_{\kappa}(t_0)} = \frac{[E_{жб}^*(t_0) A_{жб} - E_{\kappa}(t_0) A_{\kappa}] E_{\kappa}(t) E_{жб}^*(t)}{[E_{жб}^*(t) A_{жб} - E_{\kappa}(t) A_{\kappa}] E_{\kappa}(t_0) E_{жб}^*(t_0)}, \quad (20)$$

и

$$\sigma_{\kappa}(t) = \frac{[E_{жб}^*(t_0) A_{жб} - E_{\kappa}(t_0) A_{\kappa}] E_{\kappa}(t) E_{жб}^*(t)}{[E_{жб}^*(t) A_{жб} - E_{\kappa}(t) A_{\kappa}] E_{\kappa}(t_0) E_{жб}^*(t_0)} \sigma_{\kappa}(t_0). \quad (21)$$

Отметим, что значения  $\sigma_{\kappa}(\infty)$  при  $t = \infty$  получается заменой в (21)  $t$  на  $t = \infty$ ; в формулах для коэффициентов  $K_i^*$ , временных модулей деформаций  $E_i^*$  и высоты сжатой зоны  $X$ .

В связи с уменьшением во времени силы обжатия  $\sigma_{\kappa}(t) A_{\kappa}$  происходит уменьшение высоты сжатой зоны изгибаемого железобетонного элемента  $X$ , при этом увеличивается высота растянутой зоны  $h - X$ , растут  $A_{жб}$  и фибровые деформации растяжения [2], т.е. уменьшается запас трещиностойкости, а коррозионные повреждения бетона снижают  $E_{жб}^*(t)$ .

Приведенная расчетная оценка потерь обжатия выполнена с учетом неравновесных про-

$$C_{жб}^*(t, t_0) = C_{кр}^* \left[ 1 - \beta^* e^{-\gamma^*(t-t_0)} \right]. \quad (12)$$

Интегральное уравнение (8) продифференцируем по  $t$  и запишем в следующем виде:

$$\Delta' \sigma_{\kappa}(t) + \frac{L'_0 - L'_1}{L_0} \Delta\sigma_{\kappa}(t) = \sigma_{\kappa}(t_0) \frac{L'_0}{L_0}, \quad (13)$$

откуда получим решение в интегральной форме:

$$E_{жб}(t) = \frac{E_{жб, мз}(t)}{1 + E_{жб, мз}(t) C_{жб}^*(t, t_0)}. \quad (17)$$

В соответствии (4), (5) запишем:

$$\Delta\varepsilon_{\kappa}(t, t_0) = \Delta\varepsilon_{жб}(t, t_0), \text{ где}$$

$$\Delta\varepsilon_{\kappa}(t, t_0) = \varepsilon_{\kappa}(t) - \varepsilon_{\kappa}(t_0);$$

$$\Delta\varepsilon_{жб}(t, t_0) = \varepsilon_{жб}(t) - \varepsilon_{жб}(t_0), \quad (18)$$

или

$$\frac{\sigma_{\kappa}(t)}{E_{\kappa}(t)} - \frac{\sigma_{\kappa}(t_0)}{E_{\kappa}(t_0)} = \frac{\sigma_{жб}(t)}{E_{жб}^*(t)} - \frac{\sigma_{жб}(t_0)}{E_{жб}^*(t_0)},$$

$$\frac{\sigma_{\kappa}(t)}{E_{\kappa}(t)} - \frac{\sigma_{\kappa}(t_0)}{E_{\kappa}(t_0)} = \frac{A_{\kappa} \sigma_{\kappa}(t)}{A_{жб} E_{жб}^*(t)} - \frac{A_{\kappa} \sigma_{\kappa}(t_0)}{A_{жб} E_{жб}^*(t_0)},$$

т.е.

цессов: ползучести бетона, релаксации напряжений канатов, коррозионных повреждений бетона и арматуры. В частности, прогнозирование момента обнуления напряжений в бетоне растянутой части сечения, необходимое для защиты материалов от воздействия агрессивной среды, которое значительно усиливается при растяжении бетона, вызванное увеличением проницаемости, и переходом процесса продвижения коррозии от кольматационного типа к фильтрационному. Потери обжатия от усадки бетона, деформации форм (упоров), температурных перепадов и т.п. учитываются по [6].

Следуя посылке о прямоугольной форме эпюры нормальных напряжений в растянутой внешней нагрузкой части сечения, производим оценку  $\sigma_{\kappa}(t)$ . Для этого, используя условия равновесия:

$$\sigma_{\kappa}(t) A_{\kappa} = \sigma_{жб}(t) A_{жб},$$

откуда

$$\sigma_{\kappa}(t) = \sigma_{жб}(t) \frac{A_{жб}}{A_{\kappa}}, \quad (22)$$

учитывая (4), запишем:

$$\sigma_{жсб}(t)A_{жсб} = \sigma_b(t)A_b + \omega_s \sigma_s(t)A_s, \quad (23)$$

и отсюда:

$$\sigma_b(t)A_b = \sigma_{жсб}(t)A_{жсб} \frac{A_b E_b^*(t, t_0)}{A_b E_b^*(t, t_0) + \omega_s A_s E_s};$$

$$\sigma_{жсб}(t) = \sigma_b(t) \frac{(A_b E_b^*(t, t_0) + \omega_s A_s E_s)}{A_{жсб} E_b^*(t, t_0)},$$

получаем:

$$\sigma_\kappa(t) = \sigma_b(t)T(t, t_0), \quad (24)$$

где:

$$T(t, t_0) = \frac{A_b E_b^*(t, t_0) + \omega_s A_s E_s}{A_\kappa E_b^*(t, t_0)}. \quad (25)$$

Далее, по [4] задаемся функцией  $\sigma_\kappa(t)$  в виде:

$$\sigma_\kappa(t) = \sigma_\kappa(t_0) - [\sigma_\kappa(t_0) - \sigma_\kappa(\infty)] \cdot [1 - e^{-\gamma(t-t_0)}], \quad (26)$$

$$t = t_0 - \frac{1}{\gamma} \langle \ln[\sigma_b(t)T(t, t_0) - \sigma_\kappa(\infty)] \ln[\sigma_\kappa(t_0) - \sigma_\kappa(\infty)] \rangle, \quad (32)$$

где:

$$[\sigma_\kappa(t_0) - \sigma_\kappa(\infty)] > [\sigma_b(t)T(t, t_0) - \sigma_\kappa(\infty)]. \quad (33)$$

Выше определены формулы для вычисления напряжений обжатия бетона  $\sigma_b(t)$  в растянутой от внешней нагрузки части сечения. Вместе с тем, внешняя нагрузка создает в этой же части сечения напряжения растяжения бетона  $\sigma_{вн,t}$ . В интересах сохранения антикоррозионного сопротивления бетона, суммарные напряжения должны обеспечивать минимальный уровень обжатия, т.е. должно выполняться следующие условие:

$$|\sigma_b(t)| \geq |\sigma_{вн,t}|. \quad (34)$$

При решении задачи о трещиностойкости не следует допускать падения напряжений обжатия бетона ниже  $\sigma_{вн,t}$ .

Задавшись некоторым промежуточным значением:

$$t = t_1 = at_0, \quad (35)$$

запишем:

$$\gamma = -\frac{1}{(a-1)t_0} \ln \frac{[\sigma_\kappa(at_0) - \sigma_\kappa(\infty)]}{[\sigma_\kappa(t_0) - \sigma_\kappa(\infty)]}, \quad (36)$$

где  $\sigma_\kappa(at_0)$  и  $\gamma$  могут определяться по эмпирической кривой [4], находим время обнуления напряжений  $\sigma_b(t) = \sigma_{вн,t}$

$$t_{кр} = t_0 - \frac{1}{\gamma} \ln \left\langle \frac{[\sigma_{вн,t} \cdot T(\infty, t_0) - \sigma_\kappa(\infty)]}{[\sigma_\kappa(t_0) - \sigma_\kappa(\infty)]} \right\rangle. \quad (37)$$

Таким образом, предложена количественная оценка необходимого обжатия растянутой части сечения изгибаемого железобетонного элемента, осуществляемого в интересах повышения трещиностойкости. При этом предложен-

откуда:

$$\sigma_\kappa(t) = \sigma_\kappa(\infty) + [\sigma_\kappa(t_0) - \sigma_\kappa(\infty)] \cdot e^{-\gamma(t-t_0)}, \quad (27)$$

или

$$\frac{[\sigma_\kappa(t) - \sigma_\kappa(\infty)]}{[\sigma_\kappa(t_0) - \sigma_\kappa(\infty)]} = e^{-\gamma(t-t_0)}, \quad (28)$$

и далее логарифмируя обе части (28)

$$\ln \frac{[\sigma_\kappa(t) - \sigma_\kappa(\infty)]}{[\sigma_\kappa(t_0) - \sigma_\kappa(\infty)]} = -\gamma(t-t_0), \quad (29)$$

имеем:

$$\gamma = -\frac{1}{t-t_0} \ln \frac{[\sigma_\kappa(t) - \sigma_\kappa(\infty)]}{[\sigma_\kappa(t_0) - \sigma_\kappa(\infty)]}, \quad (30)$$

а также:

$$t-t_0 = -\frac{1}{\gamma} \ln \frac{[\sigma_b(t)T(t, t_0) - \sigma_\kappa(\infty)]}{[\sigma_\kappa(t_0) - \sigma_\kappa(\infty)]}, \quad (31)$$

или

ный расчет снижения уровня обжатия с учетом ползучести бетона, релаксации напряжений канатов обжатия и влияния коррозионных повреждений материалов оценивается временем, в течение которого обеспечивается трещиностойкость.

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. 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. Гольшев, А.Б. Расчет предварительно напряженных железобетонных конструкций с учетом длительных процессов. М.: – Строиздат, 1964. – 152 с.
5. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. – Вн. 2003-25-12 – М.: Изд. ФГУП ЦПП, 2004. – 54 с.
6. СП 52-102-2004 Предварительно напряженные железобетонные конструкции. – Вн. 2004-24-05 – М.: Изд. ФГУП ЦПП, 2004. – 38 с. – ISBN 5-9685-0027-1.