

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

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

СИЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН ПОВРЕЖДЕННОГО
КОРРОЗИЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Oleg.v31@yandex.ru

Введена методика определения момента трещинообразования изгибаемого железобетонного элемента, поврежденного коррозией. Учитывается нелинейность и неравновесность сопротивления бетона.

Ключевые слова: повреждения, коррозия, изгибаемый элемент

Прогноз силового сопротивления образованию трещин у поврежденного коррозией железобетона существенно необходим для оценки эксплуатационных возможностей конструкций первой категории трещиностойкости, а также при решении задач, связанных с анализом напряженно-деформируемого состояния железобетонных конструкций.

Для решения сформулированной задачи вводим посылки:

1. Рассматривается изгибаемый элемент, воспринимающий до начала агрессивнокоррозионных воздействий неизменные во времени нагрузки [2].

2. Допускается, что к моменту исчерпания ресурса силового сопротивления поврежденно-коррозией железобетона образованию трещин эпюры нормальных напряжений в бетоне растянутой зоны при нагружении очерчиваются прямоугольником [3].

3. Используются квазилинейные уравнения силового сопротивления материалов [4]:

$$\varepsilon(t, t_0) = \frac{\sigma(t)}{E_{ep}(\sigma, t, t_0)},$$

или

$$\varepsilon(t, t_0) = \frac{\bar{S}[\sigma(t)]}{E_{ep.l}(\sigma, t, t_0)}, \quad (1)$$

где $\bar{S}[\sigma(t)] = \sigma(t) \bar{S}^0[\sigma(t)]$ при

$$\bar{S}^0 = 1 + \bar{V} \left[\frac{\sigma(t)}{R} \right]^m; \quad E_{ep}(\sigma, t, t_0) = \frac{E_{ep.l}(t, t_0)}{\bar{S}^0[\sigma(t), t, t_0]},$$

где при $\sigma = const$ $E_{ep.l}(t, t_0) = \frac{E_{мэ}(t)}{1 + \varphi(t, t_0)}$, где

$$\varphi(t, t_0) = E_{мэ}(t) \cdot C^0(t, t_0),$$

где \bar{S} – единая для упругомгновенных деформаций и неравновесных деформаций ползучести функция напряжений; \bar{S}^0 – единая функция нелинейности; \bar{V} , m , – параметры нелинейности [5]; $E_{мэ}$ – модуль упругомгновенных деформаций; C^0 – мера простой ползучести [6]; σ –

напряжения; R – предел прочности; t_0, t – начальное и конечное время наблюдения.

4. Считается, что коррозионные повреждения к моменту наблюдения стабилизируются:

$$\delta(t, t_0) = [1 - \Delta\delta(t_0, t)e^{-\alpha(t-t_0)}] \delta_{кр}(t_0), \quad (2)$$

где α , $\Delta\delta(t_0, t)$, $\delta_{кр}(t_0)$ – эмпирические параметры, зависящие от сочетания свойств бетона и агрессивной коррозионной среды, а распределение повреждений по глубине бетонного образца описываются функцией сохранения характеристик силового сопротивления параболического типа [2]:

$$K^* = \sum_{i=0}^2 a_i z^i. \quad (3)$$

Использование K^* позволяет ввести прием эквивалентности, что упрощает расчеты конструктивной безопасности сооружений [2]; причем коэффициенты a_i зависят только от граничных условий. В статье рассматривается два основных варианта напряженно-деформируемого состояния (рис. 1).

На рис. 1 приняты следующие обозначения: А – зона полного разрушения бетона (толщина z^*); Б – зона частичного повреждения бетона (толщина δ , формула (2)); В – зона неповрежденного бетона (толщина $p = x - (z^* + \delta)$).

Для варианта I параметр a_i для формулы (3) находится из условий при $z = p + \delta$,

$$K^*(p + \delta) = 0, \quad (4)$$

при $z = p$,

$$K^*(p) = 1, \quad \left. \frac{dK^*(z)}{dz} \right|_{z=p} = 0, \quad (5)$$

откуда

$$a_0 = 1 - \left(\frac{p}{\delta} \right)^2; \quad a_1 = \frac{2p}{\delta^2}; \quad a_2 = -\frac{1}{\delta^2}. \quad (6)$$

Для варианта II параметры a_i для формулы (3) находятся из следующих условий

при $z = p + \delta$

$$K^*(p + \delta) = K_1^*, \quad (K_1^* > 0), \quad (7)$$

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

при $z = p$

$$K^*(p) = \left. \frac{dK^*(z)}{dz} \right|_{z=p} = 0, \quad (8)$$

$$a_2 = \frac{K_1^* - 1}{\delta^2}, \quad (9)$$

причем при $K_1^* = 0$ формулы (6) и (9) совпадают.

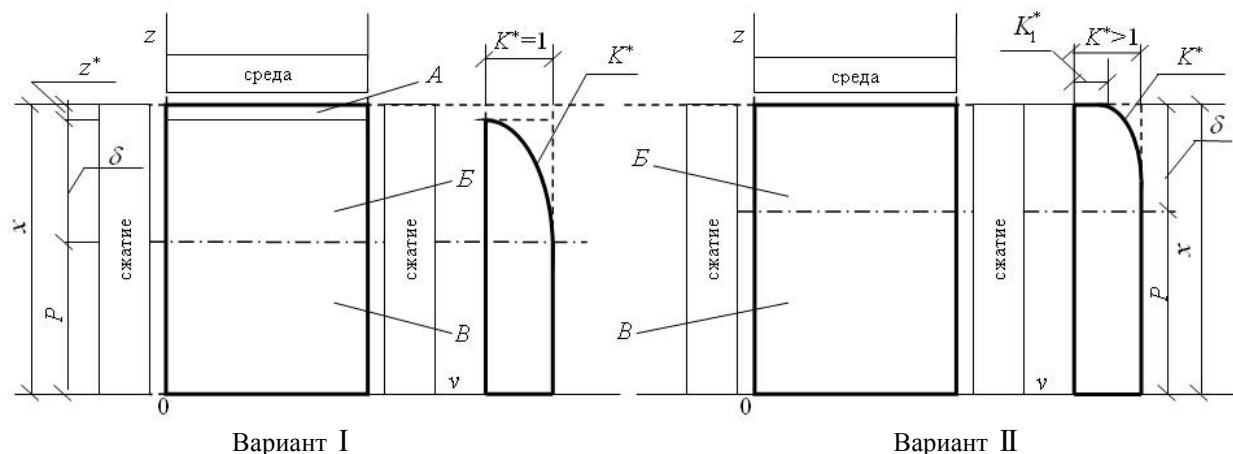


Рис. 1. Схемы коррозионных повреждений (вариант I – полного разрушения А контактного с агрессивной средой слоя z^* ; вариант II – частичное сохранение силового сопротивления в контактном слое Б)

Заметим, что z^* может быть вычислено по известным формулам или устанавливаться непосредственным замером.

Применительно к изгибаемому железобетонному элементу до образования силовых трещин в растянутой зоне для граничного напряженно-деформированного состояния имеющиеся записи (1)–(9) позволяют установить характеристики силового сопротивления

при коррозионном повреждении компонентов сечения (например, рис. 2).

Подчеркнем, что функция сохранения силового сопротивления (3) одинакова для всех характеристик бетона:

$$K^* = \frac{R^*}{R} = \frac{E^*}{E} = \frac{C^0}{C^*} = \dots \quad (10)$$

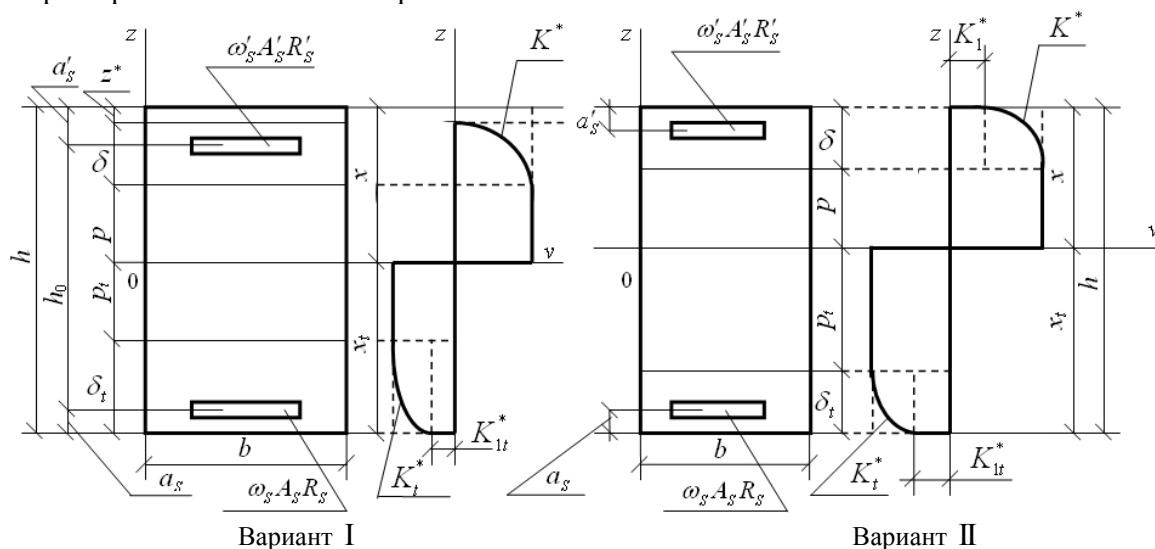


Рис. 2. Поперечное сечение железобетонного элемента (вариант I, вариант II)

Аналогично рис. 1 рассматриваются два варианта (см. рис. 2): вариант I – с наличием слоя полного разрушения А; вариант II – при отсутствии слоя полного разрушения. Далее, для граничного напряженного состояния устанавливаются расчетные площади компонентов A_i и

действующие при поперечном изгибе внутренние усилия в них

$$F_i = A_i R_i. \quad (11)$$

При этом при расчете усилий в арматуре к площадям вводятся коэффициенты сохранения

после коррозионных повреждений ω_1 и ω'_1 ($0 \leq \omega < 1$).

В интересах построения расчетных алгоритмов фигуры эпюр, содержащих K_1^* и K_{1r}^* , расчленяются на две фигуры: прямоугольную и с параболическим очертанием.

Итак, в I варианте $z^* \geq 0$ и $K_1^* = 0$ (см. рис. 2) и далее по сжатой зоне:

– по сжатой арматуре: $A_S^* = \omega'_S A_S^c$,
 $F_S^* = A_S^* R_S^c$; (12)

– по переходному слою А:

$$A_\delta = b \int_p^{p+\delta} K^*(z) dz = \frac{b}{\delta^2} \left(\frac{2}{3} \delta + p^2 \delta - p \delta^2 \right),$$

$$F_\delta = A_\delta R_b; \quad (13)$$

– по неповрежденному слою В:

$$A_p = bp = b[x - (z^* + \delta)],$$

$$x = \frac{\omega_S A_S R_S - \omega'_S A'_S R_S^c}{b(R_b + R_{bt})} + \frac{1}{3} \left(\frac{R_b}{(R_b + R_{bt})} \right) \delta + \frac{R_b}{(R_b + R_{bt})} z^* - \frac{1}{3} (1 - K_{1r}^*) \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} \delta + \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} h, \quad (18)$$

заметим, что при $z^* \geq 0$ усилие F_{S1}^* обнуляется.

Далее во II варианте $z^* > 0$ и $K_{1r}^* > 0$ (см. рис. 2).

По сжатой зоне:

– по сжатой арматуре: $A_{S1}^* = \omega'_{S1} A'_S$,
 $F_S = A_{S1}^* R_S^c$; (19)

– по переходному слою: $A_\delta^* = A_{\delta 1}^* + A_{\delta 2}^*$,

где $A_{\delta 1}^* = K_1^* b \delta$, $A_{\delta 2}^* = \frac{2}{3} (1 - K_1^*) b \delta$,

$$F_\delta = A_\delta^* R_b; \quad (20)$$

– по неповрежденному слою:

$$A_p = bp = b(x - \delta) R_b. \quad (21)$$

По растянутой зоне:

$$x = \frac{\omega_S A_S R_S - \omega'_S A'_S R_S^c}{b(R_b + R_{bt})} + (1 - K_{1r}^*) \frac{R_b}{(R_b + R_{bt})} \delta - \frac{1}{3} (1 - K_{1r}^*) \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} \delta + \frac{R_{bt}}{(R_b + R_{bt})} h. \quad (25)$$

Поскольку жесткость железобетонного элемента D^* равна сумме жесткостей всех компонентов D_i^* , отсчитываемых относительно оси, проходящей через центр тяжести приведенного сечения [6], постольку

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

где r_i – расстояние от центра тяжести i -го компонента до центра тяжести приведенного сечения, а расположение центра тяжести приве-

$$F_p = A_p R_b. \quad (14)$$

По растянутой зоне:

– по растянутой арматуре: $A_S^* = \omega_S A_S$,

$$F_S = A_S^* R_S; \quad (15)$$

– по переходному слою: $A_{\delta}^* = A_{\delta 1}^* + A_{\delta 2}^*$,

где $A_{\delta 1}^* = K_{1r}^* b \delta$, $A_{\delta 2}^* = \frac{2}{3} (1 - K_{1r}^*) b \delta$,

$$F_{\delta} = A_{\delta}^* R_{bt}; \quad (16)$$

– по неповрежденному слою:

$$A_{pt} = bp_t = b[x_t - \delta_t],$$

$$F_{pt} = A_{pt} R_{bt}. \quad (17)$$

Условие равновесия всех усилий на гори-

зонтальную ось $\sum_i^n F_i = 0$ дает высоту сжатой зоны сечения изгибаемого элемента x :

– по растянутой арматуре:

$$A_S^* = \omega_S A_S, F_S = A_S^* R_S; \quad (22)$$

– по переходному слою: $A_{\delta}^* = A_{\delta 1}^* + A_{\delta 2}^*$,

где $A_{\delta 1}^* = K_{1r}^* b \delta$, $A_{\delta 2}^* = \frac{2}{3} (1 - K_{1r}^*) b \delta$,

$$F_{\delta} = A_{\delta}^* R_{bt}; \quad (23)$$

– по неповрежденному слою:

$$A_{pt} = (h - x_t - \delta_t) b,$$

$$F_{pt} = A_{pt} R_{bt}. \quad (24)$$

Аналогично формуле (18), условие

$$\sum F_{it} = 0 \text{ дает высоту сжатой зоны:}$$

денного сечения $y_{u.m.}$ (в данном случае – растянутой грани) рассчитывается по формуле

$$y_{u.m.} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i A_i E_i}{\sum_{i=1}^n A_i E_i}. \quad (27)$$

Значения y_i определяются по рис. 2 и, следовательно, r_i будут иметь следующие значения:

Вариант I

По сжатой зоне:

– для сжатой арматуры:

$$r_S = h - (y_{u.m.} + a'_S); \quad (28)$$

– для переходного слоя:

$$r_\delta = h - \left(\frac{5}{8} \delta + z^* \right); \quad (29)$$

– для неповрежденного слоя:

$$r_p = h - \left(\delta + z^* \frac{1}{2} p \right). \quad (30)$$

По растянутой зоне:

– для растянутой арматуры:

$$r_{St} = y_{u.m.} - a_S; \quad (31)$$

– для переходного слоя:

$$r_{\delta 1} = y_{u.m.} - \frac{1}{2} \delta_t, \quad r_{\delta 2} = y_{u.m.} - \frac{5}{8} \delta_t; \quad (32)$$

– для неповрежденного слоя:

$$r_{pt} = y_{u.m.} - \left(x_t - \frac{P_t}{2} \right). \quad (33)$$

Вариант II

По сжатой зоне:

– для сжатой арматуры:

$$r_S = h - (y_{u.m.} + a'_S); \quad (34)$$

– для переходного слоя:

$$r_{\delta 1} = h - \frac{1}{2} \delta, \quad r_{\delta 2} = h - \frac{5}{8} \delta; \quad (35)$$

– для неповрежденного слоя:

$$r_p = h - \left(\delta_t + \frac{1}{2} p_t \right). \quad (36)$$

По растянутой зоне:

– для растянутой арматуры:

$$r_{St} = y_{u.m.} - a_S; \quad (37)$$

– для переходного слоя:

$$r_{\delta 1} = y_{u.m.} - \frac{1}{2} \delta_t, \quad r_{\delta 2} = y_{u.m.} - \frac{5}{8} \delta_t; \quad (38)$$

– для неповрежденного слоя:

$$r_{pt} = y_{u.m.} - \left(\delta_t + \frac{P_t}{2} \right). \quad (39)$$

Полученные данные по r_i позволяют с помощью формулы (26) найти жесткость расчетного сечения D^* (например, для $l/2$ у балки, симметрично нагруженной и имеющей одинаковые опорные условия).

Далее, учитывая [7],

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{M}{D^*} \quad \text{и} \quad \varepsilon = \frac{z}{\rho},$$

откуда

$$\varepsilon_{\phi t} = \frac{h-x}{\rho}, \quad (40)$$

где ρ – радиус кривизны; U – функция прогиба; x – абсцисса сечения, находим изгибающий момент, соответствующий образованию трещины

$$M_{mp} = \frac{K_{1t}^* \varepsilon_{\phi t}}{h-x} D^*, \quad (41)$$

где M_{mp} – изгибающий момент, при котором образуется первая трещина; D^* – жесткость наиболее нагруженного сечения поврежденного коррозией изгибаемого элемента;

$$\varepsilon_{\phi t} = K_{1t}^* \varepsilon_R, \quad (42)$$

где ε_R – предельная растяжимость при изгибе (относительная полная деформация при изгибе) растянутого фибрового волокна [1]; K_{1t}^* – коэффициент силового сопротивления.

Таким образом, установлена связь между моментом силового трещинообразования и жесткостью «опасного» сечения, зависящих, в свою очередь, от интенсивности коррозионных повреждений бетона и арматуры, нелинейности деформирования и ползучести.

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

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. Бондаренко, В.М. Некоторые фундаментальные вопросы развития теории железобетона / В.М. Бондаренко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – № 2. – С. 5 – 11.
3. Бондаренко, В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунов. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 472 с.: 182 ил.
4. Бондаренко, В.М. Учет энергетической и коррозионной диссипации силового сопротивления при оценке устойчивости строительных конструкций / В.М. Бондаренко // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 3.
5. Бондаренко, С.В. Усиление железобетонных конструкций при реконструкции зданий / С.В. Бондаренко, Р.С. Санжаровский. – М.: Стройиздат, 1990. – 352 с.: ил. – ISSN 5-274-00559-4.
6. Бондаренко, В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона / В.М. Бондаренко. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1968. – 234 с.
7. Феодосьев, А.И. Сопротивление материалов / А.И. Феодосьев. – М.: Изд-во Наука, Физматгиз, 1970.