

Расчет строительных конструкций

СПЕЦИФИКА СИЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННЫХ КОРРОЗИЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И НОВЫЕ ФАКТОРЫ РАЗРУШЕНИЯ

В.М. БОНДАРЕНКО, *д-р техн. наук, профессор, академик РААСН*
Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства

Выявлена специфика трансформации напряженного состояния эксплуатируемых железобетонных конструкций, вызванная коррозионным повреждением бетона и обуславливающая возможность послыпного лавинного обнуления их силового сопротивления.

Экспериментальными и натурными наблюдениями за состоянием бетонных (и железобетонных) конструкций при длительных физико-химических и химических воздействиях установлено, что скорость и глубина продвижения коррозионных повреждений бетона зависят не только от вида, концентрации, температуры, барометрии и других характеристик агрессивной среды и от номенклатуры бетона, но и от знака и уровня напряженного состояния конструктивного элемента. При этом возможны как затухание процесса повреждений (как правило, при эксплуатационных уровнях напряженного состояния), так и лавинное их развитие (при уровнях напряженного состояния, близких к предельному – обычно таким пределом является длительная прочность) [2]. Аналогично проявляются деформации ползучести бетона [3]. Оба эти процесса – развитие повреждений и развитие деформаций ползучести – происходят во времени, категоризируются как неравновесные и имеют общую математическую запись [2, 3]:

$$\frac{d\Delta L(t)}{dt} = \alpha[\Delta L(t)]^m \text{ при } \Delta L(t) = \frac{L_{кр} - L(t)}{L_{кр}}. \quad (1)$$

Решение уравнения (1) имеет вид

$$L(t) = f_m[\Delta L(t_0), \alpha(\eta), m(\eta), t] L_{кр}. \quad (2)$$

В частности, для целочисленных m при $m = 1$ имеем

$$f_1 = 1 - \Delta L(t_0)e^{-(t-t_0)},$$

$$\text{при } m \neq 1 \quad f_m = 1 - \{[\Delta L(t_0)]^{(-m)+1} + \alpha[(-m)+1](t-t_0)\}^{\frac{1}{(-m)+1}}, \quad (3)$$

$$\text{при } m=0 \quad f_0 = \frac{L(t_0)}{L_{кр}} + \alpha(t-t_0),$$

причем, кинетика развития повреждений (δ) и меры ползучести (C^0) при $m > 0$, характеризуемая затуханием; при $m \leq 0$ становится лавинной [2,3]. Здесь $L(t)$ – текущие во времени t значения глубины повреждения $\delta(t)$ или меры ползучести $C^0(t)$; $L_{кр}(\eta)$, $\Delta L_{кр}(\eta, t_0)$, $m(\eta)$, $\alpha(\eta)$ – эмпирически определяемые параметры процесса, различные для δ и C^0 , являющиеся функциями уровня сжатия $\eta = \sigma/R_b$ и зависящие от сочетания характеристик агрессора и бетона (σ – напряжения сжатия, R_b – предел прочности на сжатие).

Схема кинетики $L(\eta)$ приводится на рис. 1. Принимая во внимание, что при небольших уровнях сжатия η бетон уплотняется, пористость и проницаемость падают, вследствие чего развитие повреждений и деформаций ползучести замедляются ($m > 0$), а с ростом уровня сжатия η бетон разуплотняется, пористость и проницаемость увеличиваются, появляются локальные, а затем и магистральные трещины и, в целом, продвижение повреждений вглубь бетонного тела и деформации ползучести растут.

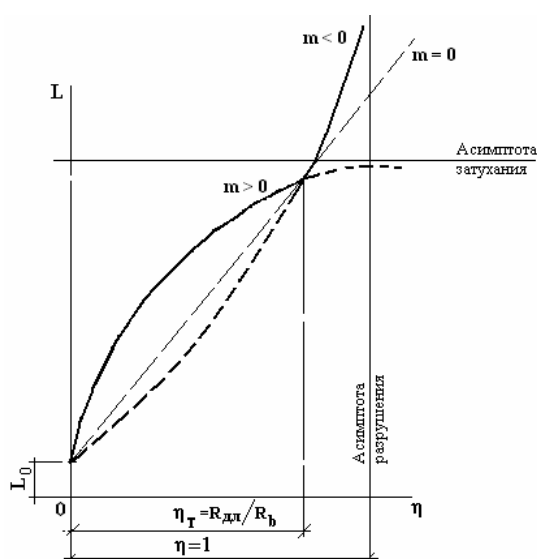


Рис. 1. Схема изменения L в зависимости от η

Для области устойчивого состояния силового сопротивления с учетом затухания неравновесных процессов ($m > 0$), это позволяет представить модель повреждения бетонного тела схемой (рис. 2) [6].



Рис. 2. Схема расположения зон различного силового сопротивления (b – ширина сечения)

На рис. 2 представлены три зоны бетонной призмы, испытывающей по наружной поверхности воздействия агрессивной среды, а по боковым поверхностям – напряжения сжатия:

- зона А – зона непосредственного контакта с агрессивной средой, в пределах которой бетон полностью разрушен (z^*);
- переходная зона В коррозионных повреждений (δ), влияние которых уменьшается по мере удаления от нижней границы зоны А и обнуляется на границе с зоной В;
- зона В – неповрежденная часть бетонного образца, сохраняющая исходный потенциал силового сопротивления (p).

Таким образом, общая толщина трех сжатых зон x^*

$$x^* = z^* + \delta + p. \quad (5)$$

В такой постановке считается, что бетон, испытывающий растяжение не участвует в создании силового сопротивления, так как он фильтрует через себя коррозионные среды^{*)}, т.е. вводится ограничение $x^* \geq z^* + \delta$.

^{*)} Требуется детальное экспериментальное исследование сопротивления растянутого бетона продвижению агрессивной среды.

Функции, указанных выше эмпирических параметров принимаются в виде [2, 3], например

$$m(\eta) = \sum_{i=0}^3 q_{mi} \eta^i, \quad (4)$$

где q_{mi} – некоторые фиксируемые опытные значения описываемых параметров.

В задачах экспертизы и обеспечения конструктивной безопасности повреждаемых коррозией железобетонных конструкций и сооружений достаточно ограничиться областью устойчивого силового сопротивления ($m > 0$), а возможность перехода в лавинную область неустойчивого состояния оценить знаком параметра $m \leq 0$.

Одновременно необходимо отметить, что приведенная схема считается одинаковой для всех случаев коррозионного повреждения бетона в условиях сжатия (при $m > 0$), вне зависимости от характеристик среды и номинации бетона. Это позволяет разработать единый метод расчета силового сопротивления поврежденных коррозией железобетонных элементов и оценить момент перехода силового сопротивления из устойчивого в неустойчивое состояние ($m < 0$).

Далее в интересах построения общего прикладного метода расчетов вводят специфические рабочие посылки:

а) об эквивалентной замене влияния повреждений условным изъятием части расчетного сечения Б и наделении оставшихся частей исходными механическими характеристиками; это определяется введением функции повреждений $K^*(z)$;

б) об усредненной оценке величин напряжения сжатия (σ) по высоте сжатой зоны повреждения Б при расчете эмпирических параметров

$$[\delta_{кр}(\eta), \alpha(\eta), m(\eta)];$$

в) об условиях сопряжения кривой функции $K^*(z)$ на границе между зоной повреждения Б и зоной исходных качеств бетона В, записанных в координатах z/ν :

$$\text{при } z = p \text{ имеем } P^*(p) = 1; \quad \left. \frac{dK^*(z)}{dz} \right|_{z=p} = 0; \quad (7)$$

$$\text{при } z^* > 0 \text{ и } z = p + \delta \text{ будет } K(p + \delta) = 0. \quad (8)$$

С учетом формы кривой K^* (рис. 2) функция повреждений $K^*(z)$ отыскивается в виде усеченного степенного ряда [2]

$$K^*(z) = \sum_{i=0}^{i=n} a_i z^i; \quad \frac{dK^*(z)}{dz} = \sum_{i=0}^{i=n} i a_i z^{i-1}. \quad (9)$$

Как показал анализ, целесообразно принять для (9) $n = 2$. Это приводит к следующим значениям a_i :

$$a_0 = 1 - \frac{p^2}{\delta^2}; \quad a_1 = \frac{2p}{\delta^2}; \quad a_2 = -\frac{1}{\delta^2}, \quad (10)$$

откуда

$$K^*(z) = \left(1 - \frac{p^2}{\delta^2}\right) + \frac{2p}{\delta^2}z - \frac{z^2}{\delta^2}. \quad (11)$$

При этом подчеркнем, что поскольку функции повреждений для всех механических характеристик, по сути, исходит только из геометрических условий (7, 8), поскольку значения $K^*(z)$ едины

$$K^* = K_R^* = K_{c^0}^* = K_{E_{нт}} = K_{E_{сп}} \text{ то есть } R^* = K^* R_b; \quad \frac{1}{c^*} = \frac{K^*}{c^0};$$

$$E_{нт}^* = K^* E_{нт}; \quad E_{сп}^* = K^* E_{сп}.$$

Реализация приведенных выше посылок и соответствующей расчетной модели иллюстрируется на примере сечения поперечного изгиба железобетонного бруса (рис. 3).

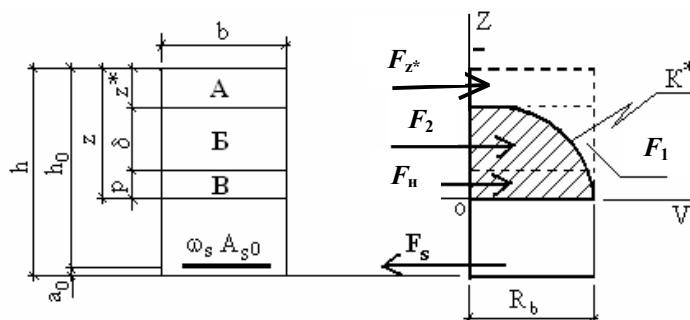


Рис. 3. Схема напряженного состояния нормального поперечного сечения поврежденного коррозией изгибаемого железобетонного бруса с единичным армированием

На рис. 3 обозначены F_{2*} – величина утерянной части силового сопротивления, обусловленная выбитием зоны А; F_1 – величина утерянной части силового сопротивления, обусловленная снижением силового сопротивления в зоне Б; F_2 – величина сохранившейся части силового сопротивления в зоне В

$$F_2 = \int_p^{p+\delta} R_b b K^*(z) dz = \frac{2}{3} b \delta R_b, \quad (12)$$

F_n – величина силового сопротивления неповрежденной зоны В

$$F_n = b p R_b; \quad (13)$$

F_s – величина силового сопротивления поврежденной коррозией расчетной арматуры A_{s0}

$$F_s = \omega_s A_{s0} R_s \quad (14)$$

где A_{s0} – исходная площадь поперечного сечения арматуры; ω_s – коэффициент коррозионного повреждения арматуры.

С учетом (12) находится расстояние от линии приложения F_2 до Н.О.-v

$$z_{2,v} = x^* - z^* - \frac{3}{8} \delta, \quad (15)$$

а остаточный ресурс силового сопротивления поврежденного железобетонного бруса, рассчитанный относительно ц.т. растянутой арматуры, равен

$$M_s^* = F_2 \left(h_0 - z^* - \frac{3}{8} \delta \right) + F_n \left[h_0 - \frac{1}{2} (x^* + z^* + \delta) \right]. \quad (16)$$

Распределение нормальных напряжений по высоте сжатой зоны при эксплуатационных нагрузках находится с помощью:

- классической связи между относительными деформациями ε , напряжением σ и временным модулем деформации [1]

$$\sigma = \varepsilon E_{\text{вп}}^*(\eta, t), \quad (17)$$

где $E_{\text{вп}}^*(\eta, t) = K^* \left[\frac{1}{E_{\text{вр}}(\eta, \delta)} + C^0(\eta, t, t_0) \right], \quad (18)$

$$E_{\text{вр}}(\eta, t) = \frac{E_{\text{врл}}(t)}{S_{\text{вр}}^0(\eta)}, \quad (19)$$

причем $E_{\text{врл}}$ – линейный модуль мгновенной деформации; C^0 – мера ползучести (3); $S_{\text{вр}}(\eta)$ – функция нелинейности мгновенных деформаций, рекомендуется применение

$$S_{\text{вр}}^0 = 1 + v \eta^m, \quad (20)$$

где v, m – эмпирические параметры нелинейности, зависящие от класса бетона [1, 3], а $\eta = \sigma/R_b$;

- гипотезы плоских сечений:

$$\varepsilon = z / \rho, \quad (21)$$

где $\rho = (M / D^*)^{-1}$ – радиус кривизны (22)

(при M – действующий изгибающий момент; $D^*(\eta, \delta, \alpha)$ – изгибная жесткость поврежденного бруса [4]).

Далее, учитывая, что исследование ведется в области устойчивого силового сопротивления ($m > 0$) вместо (18) возможно и продуктивно, аналогично СП, применение квазилинейного уравнения типа [5] при средних значениях \bar{v} и \bar{m} (например, для классов бетона В15 и В60 по табл. 1).

С помощью (9-11), (17, 18, 22) получим

$$\sigma(z) = M \frac{E_{\text{вп}}^*(\eta, t)}{D^*} F_0(z), \quad (23)$$

где $F_0(z) = z K^*(z) = \frac{1}{\delta^2} [(\delta^2 - p^2)z + 2pz^2 - z^3]$ – координатная функция, (24)

которая при $z = p$ будет $F_0 = p$; при $z = p + \delta$ будет $F = 0$.

Таблица 1

Класс бетона В	Параметры		Функции \bar{S}^0	
	$\bar{V}_{\text{нр}}$	$\bar{m}_{\text{нр}}$	S^0	\bar{S}^0
15	2,9	4,27	2,16	1,58
60	0,93	3,52	1,37	1,19

Практически, в качестве качественной оценки соотношения (23) можно принять

$$\sigma_T = R_{\text{дл}} = 0,8R_b; \quad \eta_T^m = 0,8^n = 0,4; \quad D^*(\eta, t) = 0,8 D^*(t) \quad (25)$$

и среднее значение \bar{S}^0 (табл. 1).

Используя (25) и табл. 1, представим (23) в виде

$$\sigma(z) = \frac{M E_{\text{спр.н}}(z)}{\bar{S}^0 D^*(z)} F_0(z). \quad (26)$$

Из (26) очевидно, что при фиксированных значениях M , D^a , \bar{S}^0 и $m > 0$ значения $\max F_0(z)$ и $\max \sigma(z)$ имеют одинаковую ординату

$$\frac{dF_0(z)}{dz} = \frac{1}{\delta^2} [(\delta^2 - p^2) + 4pz - 3z^2] = 0, \quad (27)$$

откуда

$$z_1 = \frac{2p \mp \sqrt{p^2 + 3\delta^2}}{3}; \quad \max F_0(z_1) = \frac{1}{\delta^2} [(\delta^2 - p^2)z_1 + 2pz_1^2 - z_1^3]. \quad (28)$$

$$\text{Теперь} \quad \max \sigma = \frac{1}{\delta^2} [(\delta^2 - p^2)z + 2pz^2 - z^3] \cdot \frac{M E_{\text{спр.н}}(z)}{\bar{S}^0 D^*(z)}. \quad (29)$$

С целью сохранения устойчивого состояния силового сопротивления, ограничим наибольшие значения напряжений σ_{max} величиной $\sigma_T = R_{\text{дл}}$ и с помощью (26) установим возможный наибольший изгибающий момент M_T

$$M_T = \frac{\sigma_T \bar{S}^0 D^{*a}}{E_{\text{спр.н}}(z) \max F_0(z_1)} \quad (30)$$

Иллюстративно рассмотрим неблагоприятный случай повреждений $p = 0$; $\delta = x^* - z^*$, причем

$$\text{при } z = 0 \text{ будет } F_0(0) = 0; \quad \text{при } z = \delta \text{ будет } T_0(\delta) = 0, \quad (31)$$

$$\text{а также} \quad z_1 = 0,557\delta, \quad \max T_0(z) = 0,385\delta; \quad \max \sigma = 0,385 M \frac{E_{\text{спр.н}}(z)\delta}{\bar{S}^0 D^*(z)} \quad (32)$$

или

$$M_T = \frac{2,6 \bar{S}^0 D^*(z) \sigma_T}{\delta E_{\text{спр.н}}(z)}. \quad (33)$$

Соответствующая эпюра действующих нормальных напряжений приведена на рис. 4.

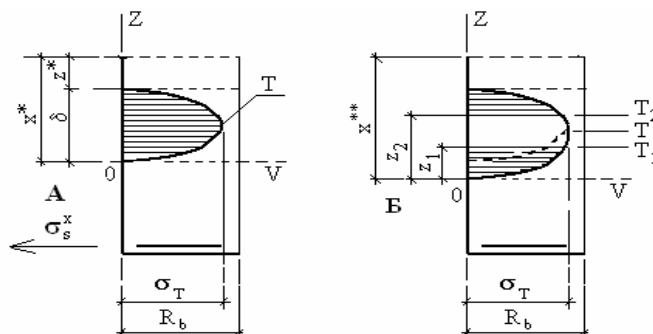


Рис. 4. Эпюры распределенных (и перераспределенных) нормальных напряжений в поперечном сечении коррозионно поврежденного железобетонного бруса при $M = M_T$ (А) и при $M > M_T$ (Б) для общего условия $p = 0$

Заметим, что незначительное превышение M над M_T и условном сохранении F_0 (24) значения функций z_1 и z_2 (Б) полосы обнуления силового сопротивления можно оценочно найти решения уравнения (26), представляя его в виде

$$az^3 + bz^2 + cz + d = 0, \quad (34)$$

где $a = \frac{ME_{\text{срл}}(c)}{S^2 D^*(c) \delta^2}$; $b = 2 \frac{MPE_{\text{срл}}(c)}{S^2 D^*(c) \delta^2}$; $c = -M(\delta^2 - p^2) \frac{E_{\text{срл}}(c)}{S^2 D^*(c) \delta^2}$; $d = -\sigma_T$. (35)

Итак, момент M_T ограничивает непосредственное использование расчетной модели устойчивого силового сопротивления. С увеличением действующего момента $M > M_T$ точка «Т» раздваивается, очертания эпюры σ и функция F_0 меняются (см. рис. 4), возникает полоса $T_1 - T_2$ обнуленного силового сопротивления ($m = 0$) напряжения перераспределяются на периферию от T , полоса обнуленного силового сопротивления $T_1 - T_2$ расширяется, высота X^{**} увеличивается ($X^{**} > X^*$); ресурсы силового сопротивления по несущей способности и по жесткости ускоренно уменьшаются вплоть до разрушения конструкции.

Л и т е р а т у р а

1. *Бондаренко В.М.* Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. – Харьков: Изд-во Харьковского госуниверситета, 1968.
2. *Бондаренко В.М.* Феноменология кинетики повреждений бетона железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде// Бетон и железобетон. – 2008. – №4.
3. *Бондаренко В.М., Карпенко Н.И.* Уровень напряженного состояния как фактор структурных изменений и реологического силового сопротивления бетона// АСАДЕ-МІА. Архитектура и строительство. – 2007. – №4.
4. *Бондаренко В.М., Ягунов Б.А.* Жесткость и отпорность поврежденного коррозией железобетона с учетом диссипации энергии// Бетон и железобетон. – 2008. – №6.
5. *Бондаренко С.В., Санжаровский Р.С.* Усиление железобетонных конструкций при реконструкции здания. – М.: «Стройиздат», 1990.
6. *Комохов П.Г., Латыпов В.И., Латыпова М.В.* Долговечность бетона и железобетона. – Уфа: Изд-во «Белая река», 1998.
7. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. – НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: «Стройиздат», 1986.

THE SPECIFIC CHARACTER OF FORCE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES DAMAGED BY CORROSION AND NEW FACTORS OF DESTRUCTION

Bondarenko V.M.

The specific character of transformation of stress state of exploited reinforced concrete structures was brought to light. This specific character is provoked by corrosion damage of concrete and provoked lay-by-lay rapid reducing force resistance to zero.

