

Байдин О. В., канд. техн. наук, докторант  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Царева А. В., аспирант,  
Иванов А., д-р техн. наук,  
Бондаренко В. М., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства

## К РАСЧЕТУ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЮ ПОВРЕЖДЕННОГО КОРРОЗИЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

oleg.v31@yandex.ru

*В работе рассматривается силовое сопротивление деформированию поврежденного коррозией железобетона с построением соответствующей расчетной модели.*

**Ключевые слова:** коррозийные повреждения, уровень напряженного состояния, сопротивление деформированию.

Продвижение коррозийных повреждений в бетон эксплуатируемых железобетонных конструкций зависит от номинации бетона и концентрации агрессивного компонента среды, качества бетона и уровня напряженного состояния [1]. По мере роста напряжений в сжатой зоне сечений в начале, до 0,45 предела прочности бетона, происходит уплотнение бетона и уменьшение его проницаемости, что сдерживает продвижение фронта повреждений, а далее с ростом напряжений структура бетона меняется, сначала появляются микротрещины, затем трещины и поры объединяются, проницаемость растет, процесс повреждений бетона интенсифицируется, глубина коррозийного фронта уве-

личивается. Однако, у эксплуатируемых конструкций существенно, что процесс коррозийных воздействий затухает во времени и повреждения стабилизируются (нагружение конструкций считается законченным до начала коррозийных воздействий, а в дальнейшем нагрузка и внешние коррозийные факторы принимаются неизменными во времени).

Кинетика продвижения фронта коррозийных повреждений бетона применительно к равномерно сжатым образцам проанализирована в [4], где введено аналитическое соотношение связи глубины повреждения, скорости и времени:

$$\frac{d(\Delta\delta)}{dt} = -\alpha(\Delta\delta)^m, \text{ где } \Delta\delta = \frac{\delta_{кр} - \delta}{\delta_{кр}} \text{ при } m \geq 1, \quad (1)$$

где:  $\delta$  – глубина фронта продвижения коррозийных повреждений к моменту наблюдения  $t$ ;  $\Delta\delta$  – относительный дефицит величины повреждений в момент времени  $t$  к его величине при стабилизации  $\delta_{кр}$ ;  $\alpha$ ,  $m$  и  $\delta_{кр}$  – эмпирические параметры, зависящие от уровня напряжений

$\eta = \frac{\sigma}{R}$  ( $\sigma$  – действующие напряжения,  $R$  – предел прочности).

Решение (1) для  $m \geq 1$  имеет вид:

$$\delta(t, t_0) = f_m(\alpha, m, t) \delta_{кр}(t_0); \quad (2)$$

когда при  $m = 1$ :  $f_1 = 1 - \Delta\delta(t_0, t_0) e^{-\alpha(t-t_0)}$ ; (3)

$$\text{при } m = 2, 3, 4, \dots: \quad f_m = 1 - \left\{ \Delta\delta(t_0, t_0) \right\}^{(m-1)} + \alpha [(-m) + 1] (t - t_0)^{\frac{1}{(m-1)}} \}. \quad (4)$$

В соответствии с описанными выше структурными изменениями бетона, зависимости параметров  $\alpha, m, \delta_{кр}$  от уровня напряжений приводятся на рис. 1 [4].

Здесь при  $\eta = 0$  будет  $m = m_0$ ;  $\alpha = \alpha_0$ ;  $\delta_{кр} = \delta_{кр,0}$ ;

при  $\eta = 0,45$  будет  $m = m_{\max}$ ;  $\alpha = \alpha_{\min}$ ;  $\delta_{кр} = \delta_{кр,\min}$ .

Причем, при  $\eta = 0,9$  будет  $m_{0,9} = 1$ , а значения  $m_0, \alpha_0, \delta_{кр,0}, m_{\max}, \alpha_{\min}, \delta_{кр,\min}, \alpha_{0,9}, \delta_{кр,0,9}$

Аппроксимация представленных на рис. 1 графиков осуществима кривыми второго порядка:

$$m = \sum_0^{i=2} q_m \eta^i; \quad \alpha = \sum_0^{i=2} q_\alpha \eta^i; \quad \delta_{кр} = \sum_0^{i=2} q_{\delta_{кр}} \eta^i. \quad (5)$$

(6)

(7)

должны быть установлены экспериментально для различных сочетаний агрессора и бетона.

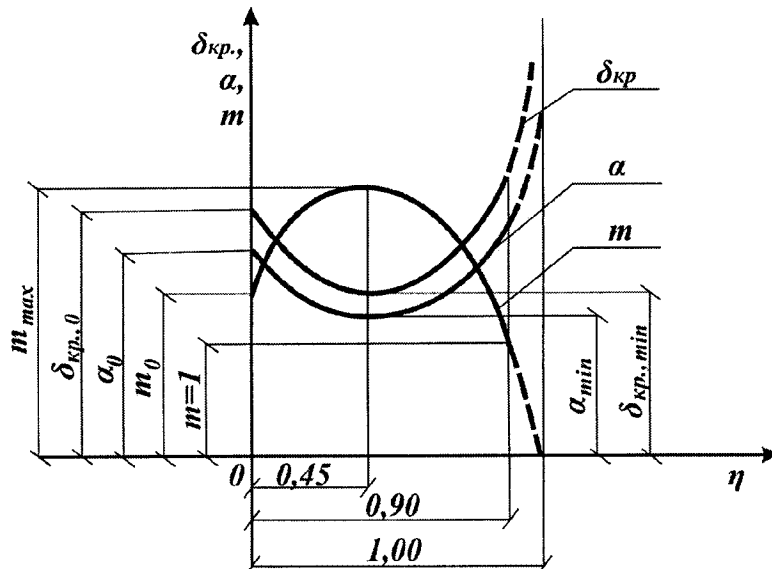


Рис. 1. Схема зависимостей эмпирических параметров  $\alpha, m, \delta_{кр}$  от уровня напряжений  $\eta$

Решения (5) при (6) дают:

– для  $m$  :

$$q_{m_0} = m_0 : q_m = \frac{1}{0,41} [(m_0 - m_{0,9}) + 2(m_{max} - m_0)]; q_{m_1} = \frac{1}{0,45} [(m_{max} - m_0) - 0,45^2 q_m]; \quad (8)$$

– для  $\alpha$  :

$$q_{\alpha_0} = \alpha_0 : q_{\alpha_1} = \frac{1}{0,9} [(\alpha_{0,9} - \alpha_0) - 2(\alpha_{min} - \alpha_0)]; q_{\alpha_2} = \frac{1}{0,45} [(\alpha_{min} - \alpha_0) - 0,45^2 q_{\alpha_1}]; \quad (9)$$

– для  $\delta_{кр}$  :

$$q_{\delta_{кр,0}} = \delta_{кр,0} : q_{\delta_{кр,1}} = \frac{1}{0,9} [(\delta_{0,9} - \delta_0) - 2(\delta_{кр,min} - \delta_{кр,0})]; q_{\delta_{кр,2}} = \frac{1}{0,45} [(\delta_{кр,min} - \delta_0) - 0,45^2 q_{\delta_{кр,1}}]. \quad (10)$$

Применительно к бетону сжатой зоны изгибаемого железобетонного элемента, напряжения в которой не неизменны по высоте, возмож-

но (до проведения специальных экспериментов) вычислить некие средние напряжения (рис. 2).

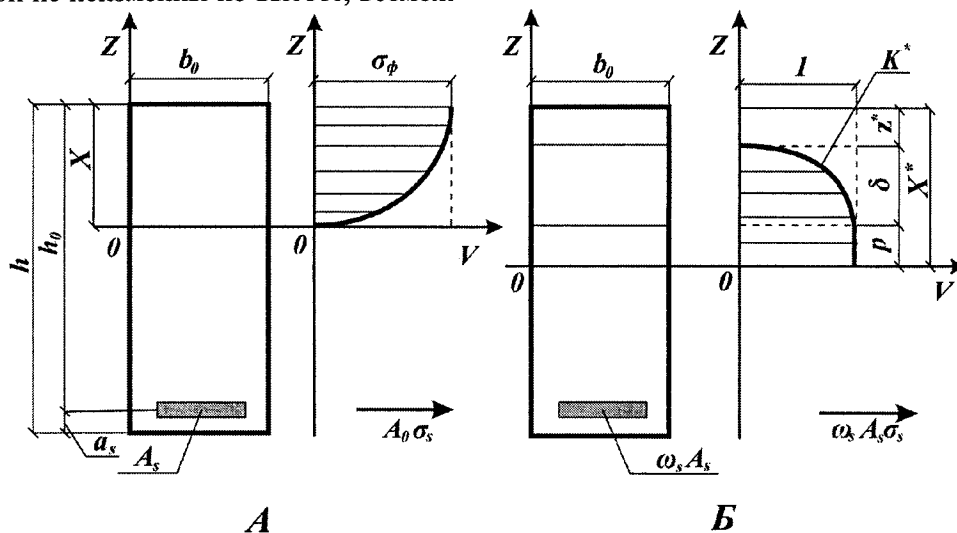


Рис. 2. Напряженное состояние сечений: вариант А. Нагруженное поперечное сечение до коррозионных повреждений; вариант Б. Нагруженное поперечное сечение после коррозионных повреждений:

$h$  – общая высота сечения;  $h_0$  – рабочая высота сечения;  $a_s$  – защитный слой бетона для арматуры;  $b_0$  – ширина сечения;  $X^*$  – высота сжатой зоны;  $\delta$  – глубина коррозионных повреждений;  $z^*$  – толщина полностью разрушенного бетона сжатой зоны;  $p$  – толщина неповрежденного слоя бетона;  $A_s$  – площадь сечения растянутой арматуры;  $\omega_s$  – коэффициент сохранения силового сопротивления арматуры;  $K^*$  – функция (кривая) сохранения механических свойств

В качестве рабочего алгоритма вычисления расчетных нормальных напряжений сжатия, не-

обходимых для оценки  $m(\eta)$ , может быть применена схема [3] – рис. 2.

$$\sigma = \sigma_{b,\phi} \left( \frac{z}{X} \right)^{n_\sigma}, \text{ где } \sigma_{b,\phi} = \frac{M}{M_{np}} R; \quad n_\sigma = 1 - \frac{M}{M_{np}}, \quad (11)$$

где:

$\sigma_{b,\phi}$  – фибровые напряжения сжатия;  $X$  – высота сжатой зоны;  $M$  – действующий в сечении изгибающий момент;  $M_{np}$  – предельный изгибающий момент.

Следует отметить, что все эти факторы (обозначенные в формуле (11)) учитываются в стадии до коррозионных повреждений.

Формула (11) для  $\sigma$  отражает любой уровень напряженного состояния в линейной и нелинейной трактовке, в частности, при  $M = 0$  будет  $n_\sigma = 1$  и эпюра  $\sigma$  очерчивается треугольником, при  $M = M_{np}$ , –  $n_\sigma = 0$  и эпюра  $\sigma$  очерчивается прямоугольником.

Далее, для сжатия среднее напряжение вычисляется (рис. 2) по следующей формуле:

$$\sigma_{cp} = \int_p^\delta \frac{\sigma dz}{\delta - p} = \frac{(X^{(1+n_\sigma)} - p^{(1+n_\sigma)})}{(1+n_\sigma)(\delta - p)X^{n_\sigma}} \frac{M}{M_{np}} R, \quad (12)$$

которое, в частности, при  $p = 0$  будет равно:

$$E_{ep,l}(t, t_0) = \left[ \frac{1}{E_{mc}(t)} + C(t, t_0) - \int_{t_0}^t \frac{\sigma(\tau) dC(t, \tau)}{\sigma(t) dt} d\tau \right]^{-1}, \quad (15)$$

а при  $\sigma = const$ :

$$E_{ep,l}(t, t_0) = \left[ \frac{1}{E_{mc}(t)} + C(t, t_0) \right]^{-1} = \frac{E_{mc}(t)}{1 + E_{mc}(t)C(t, t_0)}, \quad (16)$$

заметим, что (16) применяется в СНиП.

Здесь:

$\bar{S}^0$  – приведенная к полным относительным деформациям функция нелинейности;  $E_{mc}(t)$  и  $C(t, t_0)$  – модуль мгновенной деформации и простая ползучесть, записи которых включают влияние возраста.

Таким образом, временный модуль деформации (15), который зависит от напряжений, времени и режима, меняется по высоте сечения, вдоль пролета во времени.

При этом неизбежно, что в каждом сечении меняется положение центра тяжести приведенного сечения и, следовательно, положение осей отсчета жесткостей [6] и значений самих жесткостей, а также возмущает само перемещение центров тяжести (последние особенно значимы

$$\sigma_{cp} = \frac{X}{(1+n_\sigma)\delta} \frac{M}{M_{np}} R = \frac{X}{\left(2 - \frac{M}{M_{np}}\right)\delta} \frac{M}{M_{np}} R, \quad (13)$$

при этом, поскольку  $\sigma_{cp}$  влияет на  $\delta$ , которое в свою очередь зависит от  $m(\sigma), \alpha(\sigma), \delta_{cp}(\sigma)$ , возможны последовательные уточнения.

Уравнения силового сопротивления бетона в полных относительных деформациях и напряжениях при неубывающем режиме нагружения имеют вид [2, 6]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_{ep}(\sigma, t, t_0)} = \frac{\sigma(t) \bar{S}^0(\sigma)}{E_{ep,l}(t, t_0)}, \quad (14)$$

где временный линейный модуль деформации согласно [3] равен:

для сжатых конструкций, что меняет вдоль пролета расчетные эксцентриситеты).

Одновременно, в случае воздействия агрессивной коррозионной среды, глубина продвижения фронта которого  $\delta$  (2) также зависит от  $\sigma_{cp}$  (12), меняющегося вдоль пролета, а сами повреждения теряют интенсивность по мере углубления (рис. 2). Таким образом, помимо указанных выше факторов проявляется фактор коррозионных повреждений [6], снижающий временный модуль деформации  $E_{ep,l}$  и, следовательно, всю фигуру силового сопротивления сечений

$$E_{ep,l}^*(t, t_0) = K^* \cdot E_{ep,l}(t, t_0), \quad (17)$$

который и вводится в алгоритм расчета жесткостей.

Согласно [5], функция сохранения механических характеристик бетонов при их коррози-

онных повреждениях имеет вид (рис. 2, вариант Б):

$$K^*(z) = \sum_0^{i=2} a_i z^i, \text{ где } a_0 = 1 - \left(\frac{p}{\delta}\right)^2; a_1 = \frac{2p}{\delta^2}; a_2 = -\frac{1}{\delta^2}. \quad (18)$$

Таким образом, построена расчетная модель и представлена последовательность вычислений силового сопротивления деформированию.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Байдин, О.В.* Тенденции физических основ коррозии бетона / О.В. Байдин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 27 – 28. – ISSN 2071-7318.

2. *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.

3. *Бондаренко, В.М.* Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона / В.М. Бонда-

ренко. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1968. – 234 с.

4. *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.

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. *Царева, А.В.* Некоторые вопросы диссипации силового сопротивления деформированию эксплуатируемого железобетона / А.В. Царева, О.В. Байдин, А. Иванов, В.М. Бондаренко // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 6. – ISSN 0039-2383.