

Меркулов С. И., член-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф.,  
Татаренков А. И., канд. техн. наук, доц.  
Курский государственный университет

## ОЦЕНКА РЕЗЕРВА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

mersi.dom@yandex.ru

Приведена методика оценки резерва несущей способности железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений с учетом режима эксплуатации и технологических воздействий.

**Ключевые слова:** железобетон, конструкции, эксплуатация, несущая способность, коррозионное повреждение.

Теория железобетона должна с единых позиций описывать напряженно-деформированное состояние и оценивать резервы несущей способности конструкций на всех этапах жизненного цикла здания или сооружения на принципах количественного учета силовых и временных факторов. Основные предпосылки расчета эксплуатируемых железобетонных конструкций и оценки их конструктивной безопасности сформулированы в [1].

Силовое сопротивление сечения, подверженного коррозии, будет определяться глубиной повреждения бетона. Поставленная задача решена с учетом принятых предпосылок:

- интенсивность агрессивного воздействия среды на конструкцию принимается неизменной во времени;

- силовое сопротивление сечения восстанавливается по мере удаления рассматриваемого слоя от поверхности контакта конструкции с агрессивной средой или от слоя, полностью потерявшего силовое сопротивление;

- количественная оценка коррозионных повреждений принята на основе предложений В.М. Бондаренко [2] с использованием энтропийной модели Гульдберга-Вааге с изменением прочностных и деформативных характеристик;

- степень коррозионного повреждения арматуры оценивается снижением площади поперечного сечения.

Зависимость между напряжениями и деформациями выражается так:

$$\varepsilon(t) \cdot f[\varepsilon(t)] = \sigma(t) \cdot \left[ \frac{1}{E_m^0(t)} + A(t, t_0) \right], \quad (1)$$

где  $\varepsilon(t) \cdot f[\varepsilon(t)] = \kappa \cdot e^{m(t)\varepsilon(t)}$ ,

откуда

$$\sigma(t) = \frac{\kappa \cdot \varepsilon(t) \cdot e^{m(t)\varepsilon(t)}}{\frac{1}{E_m^0(t)} + A(t_0, t)} \quad (2)$$

В соответствии с [2] секущий временный модуль деформаций

$$E_{bp}(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\kappa \cdot e^{m\varepsilon(t)}}{\frac{1}{E_m^0(t)} + A(t_0, t)}. \quad (3)$$

Выражение (2) позволяет с единых методологических позиций описать диаграмму «напряжения-деформации» для бетона при всех режимах нагружения.

Принимаем связь между напряжениями  $\sigma_s$  и деформациями  $\varepsilon_s$  арматурных стержней без физической площадки текучести при одноосном растяжении в виде:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s \nu_s} \quad (4)$$

где  $\nu_s$  – коэффициент изменения секущего модуля.

$$\nu_0 = 1, \quad \sigma_s = \sigma_{s,u}, \quad \hat{\varepsilon}_s = \varepsilon_{s,u}, \quad (5)$$

$$\hat{\nu}_s = \frac{\hat{\sigma}_s}{E_s \hat{\varepsilon}_s} \quad (6)$$

где  $\sigma_s$  – напряжения при разрыве;  $\varepsilon_{su}$  – относительные удлинения при разрыве;  $\eta$  – уровень напряжений; при  $\sigma_s < \sigma_{s,el}$   $\eta=0$ , при

$\sigma_s > \sigma_{s,el}$

$$\eta = \frac{(\sigma_s - \sigma_{s,el})}{\left( \frac{\hat{\sigma}_s}{\hat{\varepsilon}_s} - \sigma_{s,el} \right)}. \quad (7)$$

Рассмотрен железобетонный элемент произвольной формы сечения с вертикальной осью. Для получения разрешающих уравнений рассмотрим наиболее общий случай напряженного состояния – внецентренное сжатие, частным случаем которого является изгиб. Предполагается также, что ось нулевых напряжений нормального сечения элемента совпадает с осью нулевых деформаций.

Определим напряженно-деформированное состояние и оценим несущую способность поврежденного коррозией железобетонного стержня. Рассматриваемый элемент загружен силой  $N_n$ , приложенной с эксцентриситетом  $e_n$ . На рисунке 1 представлены возможные случаи распределения напряжений и деформаций в сечении элемента. Первый случай характерен для элементов с малыми эксцентриситетами приложения внешней нагрузки, в остальных случаях эксцентриситеты постоянно увеличиваются, что

влечет увеличение растянутой зоны бетона.

Внешняя сила, действующая на рассматриваемый элемент, воспринимается неповрежденным бетоном ( $N_b, M_b$ ), бетоном, который подвержен влиянию агрессивной среды ( $N_{cr}, M_{cr}$ ), и сжатой и растянутой (менее сжатой) арматурой ( $N_{sc}, M_{sc}$  и  $N_s, M_s$ ).

Главный вектор и главный момент для поврежденного коррозией железобетонного стержня определяются выражениями:

$$N = \int_{F_b} \sigma_b(t_0, t) dF + \int_{F_{cr}} \sigma_{cr}(t_0, t) dF + \sum_{k=1}^i \sigma_{sc,i}(t_0, t) A_{sc,i} + \sum_{k=1}^i \sigma_{si}(t_0, t) A_{si}; \quad (8)$$

$$M = \int_{F_b} \sigma_b(t_0, t) (y_b) dF + \int_{F_{cr}} \sigma_{cr}(t_0, t) (y_{cr}) dF + \sum_{k=1}^i \sigma_{sc,i}(t_0, t) A_{sc,i} (y_{sc,i}) + \sum_{k=1}^i \sigma_{s,i}(t_0, t) A_{s,i} (y_{s,i}). \quad (9)$$

Проинтегрировав уравнения (8) и (9) для случая I распределения напряжений и деформаций

в элементе (рис.), получим следующие выражения:

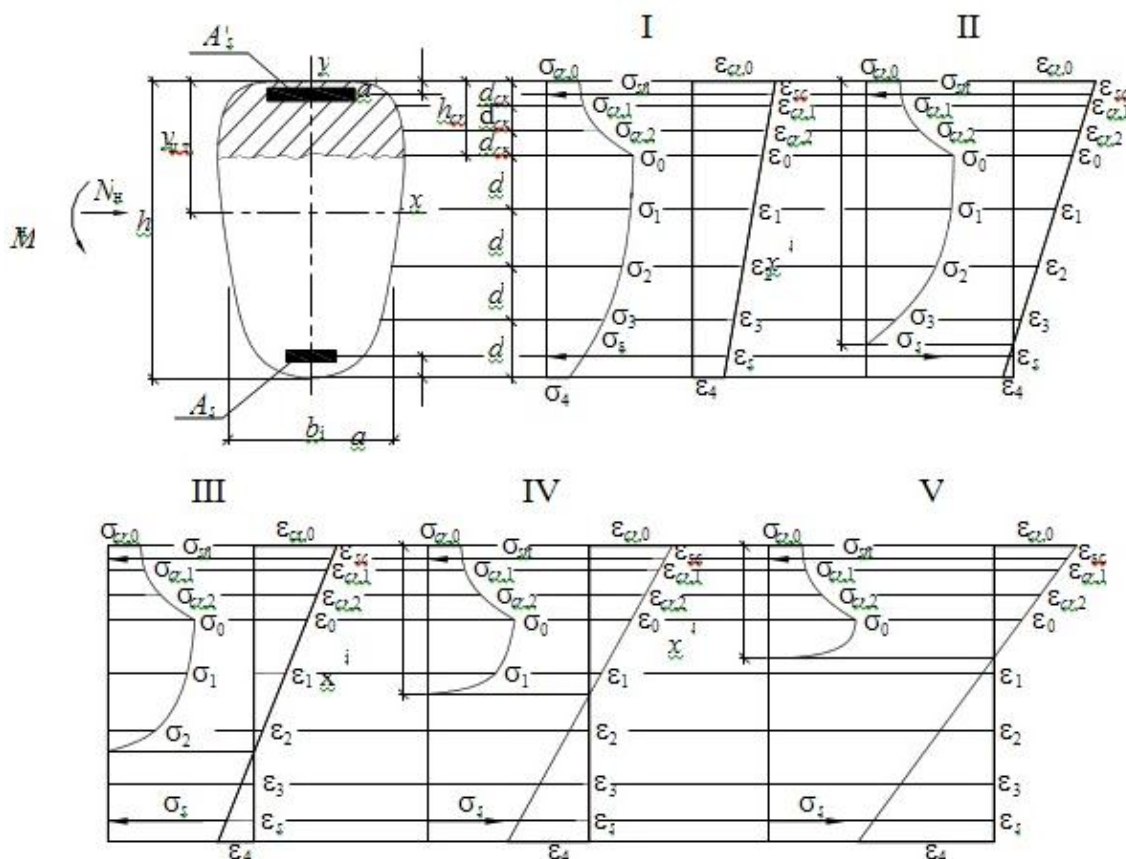


Рис. 1. Распределение напряжений и деформаций в сечении железобетонного внецентренно сжатого элемента, подверженного воздействию коррозии.

$$N = \frac{b_{cp} h_{cr}}{6} (\sigma_{cr,0} + 2\sigma_{cr,1} + 2\sigma_{cr,2} + \sigma_0) + \frac{b_{cp} (h - h_{cr})}{8} (\sigma_0 + 2\sigma_1 + 2\sigma_2 + 2\sigma_3 + \sigma_4) + \left[ \varepsilon_{cr,0} - \frac{a'}{h} (\varepsilon_{cr,0} - \varepsilon_4) \right] E_{sc} A'_s \omega_{cr} k_{cr} + \left[ (\varepsilon_{cr,0} + \varepsilon_4) \frac{a}{h} - \varepsilon_4 \right] E_s A_s; \tag{10}$$

$$M = \frac{b_{cp} h_{cr}}{6} (\sigma_{cr,0} + 2\sigma_{cr,1} + 2\sigma_{cr,2} + \sigma_0) \left( y_{ц.т.} - \frac{h_{cr}}{9} \frac{\sigma_{cr,0} + 6\sigma_{cr,1} + 12\sigma_{cr,2} + 8\sigma_0}{\sigma_{cr,0} + 2\sigma_{cr,1} + 2\sigma_{cr,2} + \sigma_0} \right) - \frac{b_{cp} (h - h_{cr})}{8} (\sigma_0 + 2\sigma_1 + 2\sigma_2 + 2\sigma_3 + \sigma_4) \left( h - y_{ц.т.} - \frac{(h - h_{cr})}{12} \times \right. \tag{11}$$

$$\left. \times \frac{11\sigma_0 + 18\sigma_1 + 12\sigma_2 + 6\sigma_3 + \sigma_4}{\sigma_0 + 2\sigma_1 + 2\sigma_2 + 2\sigma_3 + \sigma_4} \right) + \left[ \varepsilon_{cr,0} - \frac{a'}{h} (\varepsilon_{cr,0} - \varepsilon_4) \right] E_{sc} A'_s \omega_{cr} k_{cr} (y_{ц.т.} - a') + \left[ (\varepsilon_{cr,0} + \varepsilon_4) \frac{a}{h} - \varepsilon_4 \right] E_s A_s (h - y_{ц.т.} - a).$$

Деформации в рассматриваемых сечениях поврежденного и неповрежденного железобетона определяем через фибровую деформацию

сжатого бетона с учетом принятых предпосылок для расчета:

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{cr,0} \left( \frac{x_i - a'}{x_i} \right)^{n_\varepsilon}; \varepsilon_{cr,1} = \varepsilon_{cr,0} \left( \frac{x_i - d_{cr}}{x_i} \right)^{n_\varepsilon}; \tag{12}$$

$$\varepsilon_{cr,2} = \varepsilon_{cr,0} \left( \frac{x_i - 2d_{cr}}{x_i} \right)^{n_\varepsilon}; \varepsilon_0 = \varepsilon_{cr,0} \left( \frac{x_i - h_{cr}}{x_i} \right)^{n_\varepsilon};$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cr,0} \left( \frac{x_i - h_{cr}}{x_i} \right)^{n_\varepsilon}; \varepsilon_1 = \varepsilon_{cr,0} \left( \frac{x_i - h_{cr} - d}{x_i} \right)^{n_\varepsilon};$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{cr,0} \left( \frac{x_i - h_{cr} - 2d}{x_i} \right)^{n_\varepsilon}; \varepsilon_3 = \varepsilon_{cr,0} \left( \frac{x_i - h_{cr} - 3d}{x_i} \right)^{n_\varepsilon};$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cr,0} \left( \frac{x_i - h + a}{x_i} \right)^{n_\varepsilon}; \varepsilon_4 = \varepsilon_{cr,0} \left( \frac{x_i - h}{x_i} \right)^{n_\varepsilon}, \tag{13}$$

где  $n_\varepsilon$  – коэффициент, учитывающий депланацию по высоте сечения элемента.

Зная зависимость между напряжениями и деформациями в неповрежденном бетоне, в арматуре и уравнения для определения напряжений в бетоне, подвергнутом коррозии, можно определить напряженно-деформированное состояние элемента в любой рассматриваемый период времени.

Кривизну элемента можно определить, зная деформацию фибрового волокна бетона:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_{cr,0}}{x_i}. \tag{14}$$

Представление изогнутой оси стержня синусоидой и использование выражения для кривизны (14) позволяют определить прогиб середины высоты стержня:

$$f = \frac{l^2}{\pi^2} \frac{\varepsilon_{cr,0}}{x_i}. \tag{15}$$

При расчете внецентренно сжатых конструкций, когда величина прогиба соизмерима с величиной начального эксцентриситета приложения нагрузки, необходимо учитывать воздействие дополнительного момента, вызванного ростом прогибов в процессе нагружения или во времени. Поэтому внешний момент, действующий на элемент, можно представить как сумму двух моментов: начального ( $M_0 = Ne_0$ ) – от действия внешних сил и дополнительного ( $M_{дл} = Nf$ ) – от влияния продольной силы, возникающего из-за увеличения прогиба. Величина суммарного момента изменяется как в процессе увеличения нагрузки, так и при длительном ее действии:

$$M = M_0 + M_d. \quad (16)$$

Из совместного решения уравнений (10) – (13), и (16) определяется напряженно-деформированное состояние элемента до усиления. Однако полученное при этом выражение даже для элемента прямоугольного сечения громоздко, поэтому неизвестные  $\varepsilon_{cr,0}$  и  $x_i$  целесообразно определять методом последовательных приложений.

По аналогичной методике можно рассмотреть и другие случаи напряженно-деформированного состояния элемента (см. рис., случаи II - V).

В полученных выражениях описания напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых элементов деформации бетона и арматуры выражаются через фибровые де-

формации наиболее сжатой грани бетона по формулам (12). Учет влияния прогиба элемента производится аналогично первому рассмотренному случаю.

Таким образом, получены обобщающие уравнения оценки прочности и жесткости железобетонных элементов, в которых бетон и арматура поражены коррозией.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меркулов С.И. Конструктивная безопасность эксплуатируемых железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2009. №4. С.53 – 54.
2. Бондаренко В.М. Износ, повреждения и безопасность железобетонных сооружений/ В.М. Бондаренко, А.В. Боровских. М.: И.Д. Рузанова, 2000. 144 с.