

Расчет строительных конструкций

КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННОГО КОРРОЗИОННО ПОВРЕЖДАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К РАСЧЕТУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ*

В.И. КОЛЧУНОВ, *д-р техн. наук, профессор, акад. РААСН*

Н.Б. АНДРОСОВА, *канд. техн. наук*

Орловский государственный технический университет

В работе даны предложения к построению критерия прочности нагруженного коррозионно повреждаемого бетона при плоском напряженном состоянии, необходимого для решения задач живучести железобетонных конструктивных систем в условиях одновременного проявления силовых и средовых запроектных воздействий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: критерий прочности, коррозионно повреждаемый бетон, плосконапряженный элемент

Критерий прочности коррозионно повреждаемого бетона для общего случая трехосного напряженного состояния можно представить в виде:

$$\begin{aligned} N_1^2 + N_2^2 + N_3^2 - 0,5(N_1 \cdot N_2 + N_2 \cdot N_3 + N_3 \cdot N_1) - \\ - (\bar{N}_b - \bar{N}_{bt})(N_1 + N_2 + N_3) - \bar{N}_b \cdot \bar{N}_{bt} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

который для случая плоского напряженного состояния записывается в форме:

$$N_1^2 + N_2^2 - 0,5 \cdot N_1 \cdot N_2 - (\bar{N}_b - \bar{N}_{bt})(N_1 + N_2) - \bar{N}_b \cdot \bar{N}_{bt} = 0. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2): N_i - главные растягивающие усилия на площадке характерного малого характерного бетонного элемента конечных размеров коррозионно повреждаемого бетона (рис. 1); \bar{N}_b , \bar{N}_{bt} - соответственно предельные усилия на площадке характерного элемента при одноосном сжатии и одноосном растяжении, являющиеся функцией от времени τ воздействия агрессивной среды и уровня напряженного состояния.

Характерным примером рассматриваемого случая является приопорный участок однопролетной балки, в котором возникает сложное напряженное состояние сжатие-растяжение (см. рис. 1, а).

Плоское напряженное состояние реализуется в характерном элементе при действии усилий N_1 и N_2 в системе координат x , y (см. рис. 1, б).

Предельные усилия на площадке характерного элемента конечного размера толщиной t коррозионно повреждаемого бетона можно оценить по значениям предельной прочности бетона при одноосном сжатии (R_b) или одноосном растяжении (R_{bt}), полученных экспериментально испытаниями соответствующих стандартных образцов:

$$\bar{N}_b = R_b \cdot t, \quad (3) \quad \bar{N}_{bt} = R_{bt} \cdot t. \quad (4)$$

* Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту офи_ц 09-08-13600 «Изучение закономерностей силового сопротивления и параметров живучести коррозионно повреждаемых железобетонных пространственных конструктивных систем при внезапных структурных изменениях»

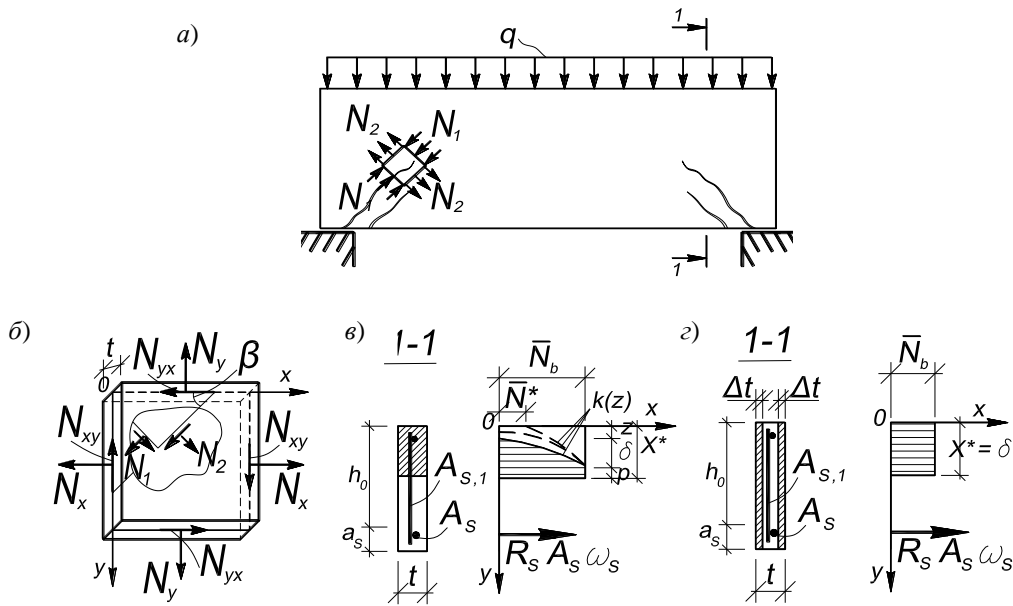


Рис. 1. К анализу плосконапряженной зоны однопролетной балки-стенки в приопорной нагруженной и коррозионно повреждаемой зоне для оценки трещиностойкости: однопролетная балка (а); характерный элемент сжатой зоны (б); расчетное сечение коррозионно повреждаемого нагруженного сечения при расчете по M (в) и по Q (г)

Усилия в характерном бетонном элементе N_x , N_y , N_{xy} в произвольной ортогональной системе координат x , y определяются следующими зависимостями (см. рис. 1, б):

$$\left. \begin{aligned} N_x &= \frac{N_1 + N_2}{2} + \frac{N_1 - N_2}{2} \cos 2\beta; \\ N_y &= \frac{N_1 + N_2}{2} - \frac{N_1 - N_2}{2} \cos 2\beta; \\ N_{xy} &= \frac{N_1 - N_2}{2} \sin 2\beta, \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где N_1 и N_2 – главные усилия; β - угол между координатной осью x и направлением большего главного усилия N_2 ; $N_x \approx \sigma_x \cdot t$; $N_y \approx \sigma_y \cdot t$; $N_{xy} \approx \tau_{xy} \cdot t$.

Учитывая, что бетон под нагрузкой проявляет себя внешне как неоднородный упруго-вязко-пластический материал, разрушение которого совпадает с нарушением его сплошности [1], разрушение оценивается по значениям предельных деформаций: при сжатии - ε_{bu} и при растяжении - ε_{btu} .

В качестве физической основы для построения расчетных зависимостей силового сопротивления нагруженных и коррозионно повреждаемых железобетонных элементов (см. рис. 1, в, г) используется специфическая посылка В.М. Бондаренко о феноменологическом единообразии кинетики неравновесных процессов повреждений и развития нелинейных деформаций, а так же о константности режимных и физико-механических факторов внешних воздействий на бетон [2]. Природа несилловых агрессивных воздействий может быть раз-

ной, однако, с феноменологической точки зрения, основываясь на гипотетической среде, процесс развития повреждений и силового сопротивления поврежденных конструкций имеет единообразное описание.

Полагая, что скорость продвижения коррозионного фронта, замедляясь во времени, пропорциональна дефициту глубины повреждений, кинетику неравновесных процессов продвижения коррозии вглубь сечения, следуя [2], можно представить единой математической зависимостью вида:

$$d[\Delta\delta(t, t_0)]/dt = -\alpha[\Delta\delta(t, t_0)]^m, \quad (6)$$

где $\Delta\delta(t, t_0)$ – текущее значение параметра глубины повреждений нагруженного железобетонного элемента с изменяющимися характеристиками силового сопротивления, определяемое из выражения:

$$\Delta\delta(t, t_0) = [\delta_{кр} - \delta(t, t_0)] / \delta_{кр}, \quad (7)$$

t – текущее время; t_0 – время начала наблюдений; α, m – параметры скорости, вида повреждений, как функции уровня и знака напряженного состояния; $\delta_{кр}$ – некоторый эмпирический параметр процесса повреждений, связанный с уровнем нагружения (для кольматационного вида повреждений – предельная величина глубины повреждения для сжатого бетона).

Коррозионные повреждения в зависимости от особенностей физических или химических воздействий, состава бетона, а также уровня напряженного состояния $\zeta = \sigma / R_b$ могут по-разному развиваться во времени и по глубине поражения [3]:

1. Энтропийно, затухая во времени, со стабилизацией на некоторой критической (предельной) глубине повреждения (глубине нейтрализации) $\delta_{кр}$ с кольматационным преобразованием структуры бетона;
2. Линейно, с постоянной скоростью продвижения фронта повреждения, без стабилизации, для которых величина $\delta_{кр}$ меняет первоначальный смысл и становится неким эмпирическим параметром процесса повреждений;
3. Лавинно, интенсифицируясь во времени, с неизбежным разрушением материалов и сооружений.

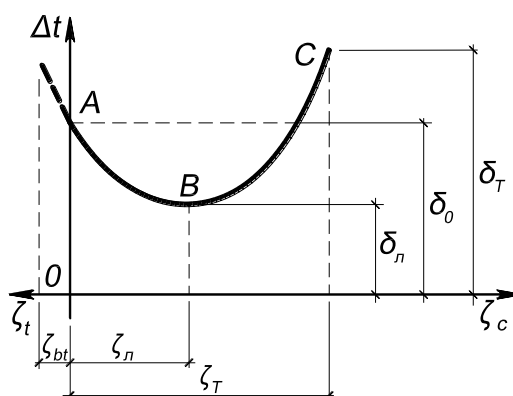


Рис. 2. Схема кинетики повреждений и изменения параметра толщины Δt при сжатии бетона в зависимости от уровня напряжений $\zeta = \sigma / R_b$

Изменения параметров глубины повреждения сечения коррозией $\delta_{кр}$ при аппроксимации полиномами представляются в следующем виде (рис. 2):

$$\delta_{кр} \left(\left. \right\rangle \right) = \sum_{i=0}^{i=3} q \delta_i \left(\left. \right\rangle \right); \quad \frac{\partial \delta_{кр} \left(\left. \right\rangle \right)}{\partial \left(\left. \right\rangle \right)} = \sum_{i=1}^{i=3} i q \delta_i \left(\left. \right\rangle \right)^{-1}; \quad (8)$$

где $q \delta_i$, $q m_i$, $q \alpha_i$ – параметры, определяемые на базе экспериментально фиксированных значений δ_0 , δ_l , δ_T ; m_0 , m_l , m_T ; α_0 , α_l , α_T с помощью простейших линейных алгебраических уравнений

Индекс « 0 » параметров экспериментально фиксированных значений формулы (8) обозначает нулевое напряженное состояние (точка А); индекс « l » – точку Ю.Н. Хромца, возникновения в бетоне структурных трещин, предшествующих разрушению (точка С), которые соответствуют условиям двухосного сжатия (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \text{при } \zeta_0 = \frac{\sigma}{R_b} = 0 \text{ будет } \delta_{кр} = \delta_0; m = m_0; \alpha = \alpha_0; \\ \text{при } \zeta_l = \frac{\sigma}{R_b} = \frac{\sigma_l}{R_b} \text{ будет } \delta_{кр} = \delta_l; m = m_l; \alpha = \alpha_l; \\ \frac{\partial \delta_{кр}}{\partial \left(\frac{\sigma}{R_b} \right)} = 0; \quad \frac{\partial m}{\partial \left(\frac{\sigma}{R_b} \right)} = 0; \quad \frac{\partial \alpha}{\partial \left(\frac{\sigma}{R_b} \right)} = 0; \\ \text{при } \zeta_T = \frac{\sigma}{R_b} = \frac{\sigma_T}{R_b} \text{ будет } \delta_{кр} = \delta_T; m \cong 0; \alpha \cong 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Приведем простейший пример по определению прочности бетона в следующих вариантах:

- 1 вариант – одноосное напряженное состояние ненагруженного бетонного элемента;
- 2 вариант – одноосное напряженное состояние коррозионно повреждаемого ненагруженного бетонного элемента;
- 3 вариант – одноосное напряженное состояние коррозионно повреждаемого нагруженного бетонного элемента.

Вариант 1. Для определения прочности бетона возраста t принята теория Г.А. Гениева [4], в соответствии с которой учет эффекта старения бетона сводится к определению его предела прочности при одноосном напряженно-деформированном состоянии и определяется зависимостью:

$$R \left(\left. \right\rangle \right) = R_m \cdot \left[1 - \left(\left. \right\rangle \right) \frac{R_{28}}{R_m} \frac{t+t_0}{28} \right], \quad (10)$$

где t_0 - время (в сутках) с момента изготовления (укладки) бетона до момента приложения внешней нагрузки; t - время действия внешней нагрузки; R_m - максимальная (асимптотическая) прочность ненагруженного бетона при $t_0 \rightarrow \infty$; R_{28} - прочность бетона в возрасте 28 суток.

Прочность бетона в момент его нагружения ($t=0$), следуя (10), составит:

$$R \left(\left. \right\rangle \right) = R_m \cdot \left[1 - \left(\left. \right\rangle \right) \frac{R_{28}}{R_m} \frac{t_0}{28} \right]. \quad (11)$$

В таблице 1 приведены вычисленные значения пределов прочности при одноосном сжатии R_b бетона класса В20 с учетом эффекта старения.

Таблица 1. Значения пределов прочности бетона при одноосном напряженном состоянии элемента без нагрузки

| | | | | | | | |
|-----------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Время нагружения t , сут. | 0 | 120 | 240 | 360 | 480 | 600 | 720 |
| R_0 | - | 14,37 | 13,76 | 13,18 | 12,63 | 12,10 | 11,58 |

Вариант 2. Уровень одноосного напряженного состояния ненагруженного элемента под действием коррозии определили следующим образом:

- прочность бетона возраста t с учетом эффекта старения по формуле (11);
- прочность бетона корродирующего во времени τ под воздействием агрессивной среды – на основе зависимости в работе [5]:

$$R_{ar,c} = a \cdot R_b \cdot \tau^b, \quad (12)$$

где τ - время воздействия агрессивной среды в сутках; a, b - коэффициенты модели, определяемые в зависимости от вида агрессивной среды.

В таблице 2 приведены вычисленные значения пределов прочности при одноосном сжатии R_b в возрасте t бетона класса В20, зависящие от времени воздействия агрессивной среды (в качестве примера был принят раствор соляной кислоты 1%).

Таблица 2. Значения пределов прочности коррозионно повреждаемого ненагруженного бетона при одноосном напряженном состоянии элемента

| | | | | | | | |
|-----------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Время нагружения t , сут. | 0 | 120 | 240 | 360 | 480 | 600 | 720 |
| R_0 | - | 14,37 | 13,76 | 13,18 | 12,63 | 12,10 | 11,58 |
| $R_{ar,c}$ | - | 11,54 | 10,39 | 9,60 | 8,97 | 8,42 | 7,93 |

Вариант 3. В виду отсутствия экспериментальных данных критерий прочности (2) для плоского напряженного состояния [6] представлен в виде одного частного случая при $\sigma_2 = 0$:

$$\sigma_1^2 - R_b - R_{bt} \cdot \sigma_1 - R_b \cdot R_{bt} = 0, \quad (13)$$

решением которого являются:

$$\sigma_1 = R_b, \quad (14) \quad \sigma_1 = -R_{bt}. \quad (15)$$

Нулевое напряженное состояние (см. точка А рис. 2) $\zeta_0 = \sigma/R_b = 0$ при $\delta_{кр} = \delta_0$ (несиловое повреждение ненагруженного образца). При рассматриваемом напряженном состоянии $\sigma_b = 0$; прочность бетона R_b принимается из таблицы 2 в соответствии со временем воздействия агрессивной среды.

При напряженном состоянии в границах:

$$\zeta_l = \frac{\sigma}{R_b} = \frac{\sigma_l}{R_b} \leq 0,5 \quad (16)$$

происходит линейное деформирование и одновременное уплотнение бетона (точка В соответствует пределу линейного напряженного состояния). Исходя из

формул (14) и (16), предел линейного напряженного состояния в точке В составляет: $\sigma_b^{\text{Q}} = 0,5R_{ar,c}$.

Структурное разуплотнение и начало магистрального трещинообразования соответствует (т. С соответствует пределу сохранения целостности бетона):

$$\zeta_T = \frac{\sigma}{R_b} = \frac{\sigma_T}{R_b} \leq 0,75. \quad (17)$$

Предельное напряжение сжатию, исходя из формул (14) и (17), в точке С составляет: $\sigma_b^{\text{Q}} = 0,75R_{ar,c}$.

В таблице 3 приведены вычисленные значения пределов прочности при одноосном сжатии R_b в возрасте t бетона класса В20 в зависимости от времени воздействия агрессивной среды и уровня напряженного состояния.

Таблица 3. Значения пределов прочности коррозионно повреждаемого нагруженного бетона при одноосном напряженном состоянии элемента

| Время нагружения t , сут. | 0 | 120 | 240 | 360 | 480 | 600 | 720 |
|------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| R_0 | - | 14,37 | 13,76 | 13,18 | 12,63 | 12,10 | 11,58 |
| $R_{ar,c}$ при $\sigma/R_b = 0$ | - | 11,54 | 10,39 | 9,60 | 8,97 | 8,42 | 7,93 |
| $R_{ar,c}$ при $\sigma/R_b = 0,5$ | - | 5,77 | 5,20 | 4,8 | 4,49 | 4,21 | 3,97 |
| $R_{ar,c}$ при $\sigma/R_b = 0,75$ | - | 10,78 | 7,79 | 7,2 | 9,47 | 6,32 | 5,95 |

Анализ представленных в примере вариантов изменения значений прочности бетона во времени показал, что при одноосном напряженном состоянии прочность коррозионно повреждаемого нагруженного бетона снижается на 25%. Приведенные отличия существенны и должны учитываться при решении задач живучести железобетонных конструктивных систем в условиях прочности железобетонных элементов по наклонному сечению и одновременного проявления силовых, средовых запроектных воздействий.

Л и т е р а т у р а

1. Бондаренко, В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона [Текст] / В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004. – 472 с.
2. Бондаренко, В.М. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионных повреждений [Текст] / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов, Н.В. Клюева // Известия ВУЗов. Строительство. – 2008. – №1. – С. 4-12.
3. Бондаренко, В.М. Феноменология кинетики повреждений железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде [Текст] / В.М. Бондаренко // Бетон и железобетон. – 2008. - №2. – С. 25-27.
4. Гениев, Г.А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях [Текст] / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Клюева [и др.]. – М.: АСВ, 2004. – 216 с.
5. Попеско, А.И. Работоспособность железобетонных конструкций, подверженных коррозии [Текст] / А.И. Попеско. – СПб.: ГАСУ, 1996. – 182 с.
6. Клюева, Н.В. Общий критерий прочности коррозионно повреждаемого бетона при плоском напряженном состоянии [Текст] / Н.В. Клюева, Н.Б. Андросова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. - №1. – С. 29-34.

**CRITERION OF DURABILITY OF PLANE-STRESSED CORROSION DAMAGED
CONCRETE ELEMENT AND ITS APPLICATION TO CALCULATION
OF FERRO-CONCRETE CONSTRUCTIONS**

Kolchunov V.I., Androsova N.B.

In work advise to construction of criterion of durability loaded corrosion damaged concrete are given at plane stress, necessary for the decision of problems of survivability of ferro-concrete constructive systems in the conditions of simultaneous display power and excited environment extremal influences.

KEY WORDS: criterion of durability, corrosion damaged concrete, plane-stressed element.

