

5. Вычисляют кольцевые напряжения по формулам Ляме (по-видимому, достаточно трех точек: на внутренней, внешней и срединной поверхности бетонного слоя).

6. Вычисляют кольцевые напряжения в тех же точках из гиперболического критерия прочности бетона [2]

$$\tau_{\beta} = \tau_{+} + (\tau_{-} - \tau_{+}) \left(\frac{1 - \mu}{\sqrt{3 + \mu^2}} \right)^3, \quad (16)$$

либо

$$(\tau_{\beta} - \tau_{+})(3 + \mu^2)\sqrt{3 + \mu^2} - (\tau_{-} - \tau_{+})(1 - \mu)^3 = 0, \quad (16)$$

что то же самое, здесь

$$\tau_{\beta} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (17)$$

$$\tau_{+} = \sqrt{\frac{6\sigma_{oct} [(\lambda - 1)(a + 0,5\lambda)\sigma_{oct} + (f_c - f_t)(1 + 0,5\lambda)] + (a + 0,5\lambda)f_c f_t}{6(1 + 0,5\lambda)(a + 0,5\lambda)}}. \quad (18)$$

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (19)$$

$\lambda = 1,25$, $a = 3,03124$

f_c , f_t – пределы прочности при одноосном напряженном состоянии или нормативные сопротивления;

$$\mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (20)$$

$$\tau_{-} = \sqrt{\frac{3\sigma_{oct} [(\varphi - 1)\sigma_{oct} + f_c - f_t] + f_c f_t}{3(1 + 0,5\varphi)}}, \quad (21)$$

$$\varphi = 2 \frac{3\chi - m}{3\chi + m},$$

$\chi = f_c / f_t$ – параметр хрупкости; $m = 2$ – класс материала (тяжелый бетон); σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные напряжения в бетонном слое ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$).

Максимальное напряжение σ_1^{cr} вычисляют из критерия (16), приняв $\sigma_3^{cr} = \sigma_0$, $\sigma_2^{cr} = p_{el}$, если $\sigma_0 < p_{el}$ – для внутренней поверхности.

Для наружной поверхности $\sigma_3^{cr} = p_{el}$, $\sigma_2^{cr} = p_{et}$, σ_1^{cr} – из критерия (16).

Для срединной поверхности $\sigma_3^{cr} = p_{el}$, $\sigma_2^{cr}(\sigma_0, p_{et})$ – по формуле Ляме, σ_1^{cr} – из критерия (16).

Все три критериальных значения напряжений сравнивают с кольцевыми напряжениями по Ляме в трех упомянутых точках. Делают выводы. Фактические (по Ляме) напряжения не должны превышать критериальных (предельных).

Стальной слой тоже должен быть проверен хотя бы на прочность.

Проверка устойчивости стального слоя, сопряженного с бетонным, это самостоятельная работа, еще, по-видимому, не решенная.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукша, Л.К. Алгоритм расчета прочности слоистого сталебетона / Л.К. Лукша, В.В. Тур // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2007. – №1. – С. 106–109.
2. Лукша, Л.К. Гиперболические критерии прочности хрупких материалов / Л.К. Лукша // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. Сб. научных трудов Международного научно-методического межвузовского семинара. – Могилёв: Белорусско-Российский университет, 2005. – С. 29–39.

Материал поступил в редакцию 07.04.08

LUKSHA L.K. Account of durability steel of a concrete protective environment nuclear reaktor aes on influence of assembly efforts

In clause the method of account of durability two-layer steel of a concrete protective environment nuclear reaktor AES for a case of absence of axial pressure in a steel layer is given.

УДК 624.012.45.001.24

Лукша Л.К.

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОИСТЫХ СТАЛЕБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТИПА "ТРУБА В БЕТОНЕ"

Введение. Большинство решений с помощью алгоритма расчета прочности слоистого сталебетона [1] научных задач касается несущих элементов слоистых сталебетонных конструкций, сформированных по типу "бетон в трубе". Однако в практике строительства имеют место и элементы, сформированные по типу "труба в бетоне". К ним, например, относятся трехслойные сталебетонные элементы, в которых внутренняя стальная труба заключена в бетонный промежуточный слой, защитные сталебетонные оболочки корпусов ядерных реакторов, стенки сталебетонных корпусов ядерных реакторов АЭС и т.п. Теория расчета прочности таких элементов еще не разработана. Между тем, упомянутый алгоритм [1] позволяет решать такие научные задачи. Покажем это на примере.

Постановка задачи. Пусть имеем слоистый сталебетонный элемент, фрагмент которого показан на рис. 1. Элемент нагружается давлением p_{ext} от предварительного напряжения и осевой продольной силой N по типу жесткого штампа. Требуется найти осевую несущую способность N двухслойного элемента при заданных ме-

хано-геометрических параметрах соответствующих слоев и внешнем обжатии p_{ext} (от поперечного предварительного напряжения бетонного слоя, либо от бокового давления наружной стальной трубы).

Решение задачи. Для решения поставленной задачи принимаются следующие предпосылки:

- элемент нагружается статической кратковременно действующей центральной приложенной сжимающей продольной силой N ;
- бетон – упруго-пластический, изотропный материал, подчиняющийся линейному либо линеаризованному критериям прочности;
- материал стального слоя подчиняется линейному критерию текучести;
- зависимости между напряжениями и деформациями стали и бетона подчиняются обобщенному закону Гука;
- осевая сила приложена к обоим слоям по типу жесткого штампа;
- осевые укорочения обоих слоев равны между собой;
- бетонный слой не работает на растяжение при действии давления от стального слоя в связи с малой растяжимостью бетона;

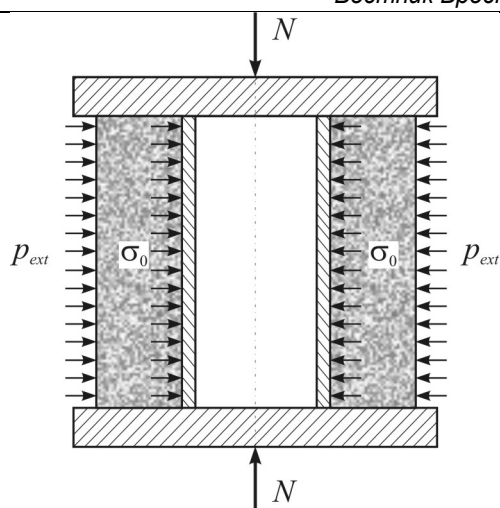


Рис. 1. Напряженное состояние элемента

- в связи с преодолением предела прочности на растяжение в поперечном направлении в процессе нагружения бетон согласно критерию прочности теряет способность к сопротивлению в осевом направлении;
- осевое сопротивление бетона происходит только за счет поперечных сжимающих напряжений.

Принимая во внимание физическую модель задачи согласно рис. 2, математическую модель можно представить следующим образом:

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \sigma_p - \sigma_\theta = 0, \quad (1)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y, \quad (2)$$

$$\sigma_{1c} - f_c - K\sigma_p = 0, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{zs} - \varepsilon_{zc} = 0, \quad (4)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu (\sigma_p + \sigma_\theta) \right]. \quad (5)$$

В математической модели (1-5) приняты следующие обозначения: ρ – текущий радиус элементарного волокна стального слоя; σ_p – текущее радиальное напряжение, действующее на элементарное волокно; σ_θ – кольцевое напряжение в элементарном волокне; σ_1 – максимальное главное напряжение в стальном слое; σ_3 – минимальное главное напряжение в стальном слое; σ_y – предел текучести или расчетная характеристика стального слоя; σ_{1c} – максимальное главное напряжение в бетонном слое; f_c – предел прочности при одноосном сжатии бетона либо расчетное сопротивление; K – коэффициент эффективности бокового давления, в первом приближении $K = 4$, для последующих приближений

$$K = 10 - 100\sigma_0 / (f_c + 15\sigma_0), \quad (3.1)$$

ε_{zs} – осевая относительная деформация укорочения стального слоя; ε_{zc} – осевая относительная деформация укорочения бетонного слоя; ε_z – осевая относительная деформация укорочения произвольного слоя; E – модуль упругости материала произвольного слоя; σ_z – осевое напряжение в произвольном слое; ν – коэффициент Пуассона материала произвольного слоя.

Из рассмотрения совместности перемещений (4), используя (5), получаем

$$E_c \left[-\sigma_{sz} - \nu_s (-\sigma_p - \sigma_\theta) \right] = E_s \left[-\gamma_c (-p_{ext} + \sigma_p) - \nu_c \left(\sigma_p - p_{ext} - \frac{p_{ext}\beta_c}{\beta_c - 1} \right) \right], \quad (6)$$

где $\beta_c > 1$ – отношение диаметров бетонного ядра; γ_c – коэффициент эффективности бокового давления для трубчатого бетонного слоя

$$\gamma_c = \frac{K\beta_c^2}{\beta_c^2 - 1} \left[1 + \frac{2\ln(1/\beta_c)}{\beta_c^2 - 1} \right]. \quad (7)$$

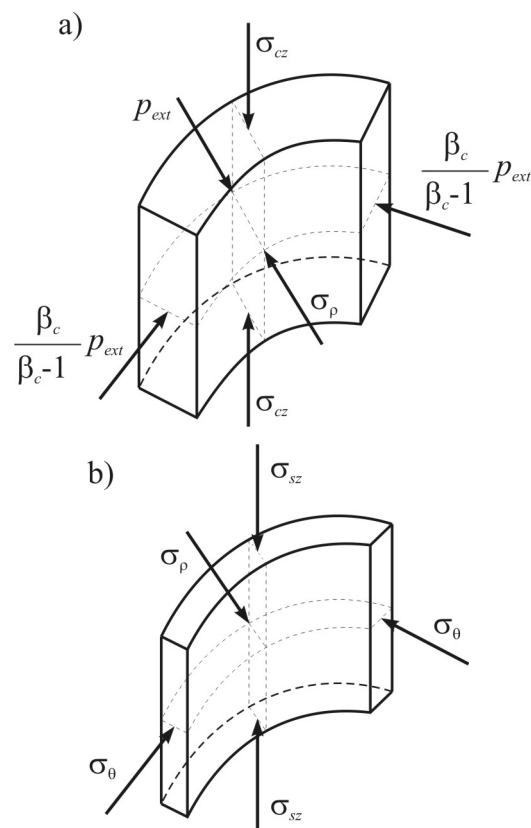


Рис. 2. Предельные напряжения а) в наружном бетонном слое; б) в стальном слое

Правая часть зависимости (6) не содержит параметра f_c , т.к. согласно последним двум исходным предпосылкам он в данном случае равен нулю.

Решая уравнение (6) относительно осевого напряжения в элементарном волокне стального слоя, получаем

$$\sigma_{sz} = \nu_s (\sigma_p + \sigma_\theta) + \alpha \sigma_p (\gamma_c + \nu_c) + \alpha p_{ext} \left[\frac{\nu_c (1 - 2\beta_c)}{\beta_c - 1} - \gamma_c \right], \quad (8)$$

где $\alpha = E_s/E_c$ – отношение модулей упругости материалов слоев.

Критерий текучести (2), принимая во внимание величины главных напряжений, в цилиндрических координатах необходимо записать следующим образом

$$\sigma_p - \sigma_{sz} = \sigma_y. \quad (9)$$

Решая (9) относительно осевого напряжения в стальном слое и подставляя его значение в (8), находим значение кольцевого напряжения в элементарном волокне стального слоя

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_p - v_s \sigma_p - \alpha \gamma_c \sigma_p - \alpha v_c \sigma_p + \alpha \gamma_c p_{ext} - \alpha v_c p_{ext} (1 - 2\beta_c) / (\beta_c - 1) - \sigma_y}{v_c} \quad (10)$$

гать даже 10 (см. формулу (3.1)). Кроме того, принято, что стальная труба находится в цилиндрическом напряженном состоянии

Подставляя это значение в уравнение равновесия (1), получаем

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} = - \frac{A\sigma_p + \sigma_y - \alpha \gamma_c p_{ext} + \alpha v_c p_{ext} (1 - 2\beta_c) / (\beta_c - 1)}{v_s} \quad (11)$$

где $A = \alpha(\gamma_c + v_c)$.

После интегрирования дифференциального уравнения (11), рассмотрения начальных и граничных условий, получаем значение бокового давления бетонного слоя на стальной слой

$$\sigma_0 = - \frac{\sigma_y - \alpha \gamma_c p_{ext} + \alpha v_c p_{ext} (1 - 2\beta_c) / (\beta_c - 1)}{\alpha(\gamma_c + v_c)} \times \left[1 - \beta_s \frac{\alpha(\gamma_c + v_c)}{v_s} \right], \quad (12)$$

где $\beta_s > 1$ – отношение диаметров стального слоя.

Знак "минус" перед дробью в (12) указывает на то, что боковое давление σ_0 является сжимающим.

Поскольку боковое взаимодействие между слоями (12) определено, то осевую несущую способность элемента можно вычислить с помощью критерия прочности в форме неротационного двухполостного гиперболоида [2] – для бетонного слоя – и критерия текучести – для стального слоя. Однако пользуясь линеаризацией критериев предельного состояния бетона и стали, можно дать упрощенный расчет осевых предельных усилий, а именно

$$N_c = A_c \left[f_c + K(|\sigma_0| + p_{ext}) / 2 \right] \quad (13)$$

– для бетонного слоя.

Для стального слоя

$$N_s = A_s \left[\sigma_y + |\sigma_0| \right]. \quad (14)$$

Формула (14) получена из трех соображений, что коэффициент эффективности для стали при цилиндрическом сжатии $K_s = 1$, в то время как для бетона он всегда больше единицы и может дости-

($|\sigma_1| > |\sigma_2| = |\sigma_3| = |\sigma_0|$), хотя фактически кольцевое напряжение $|\sigma_2|$ в ней превышает боковое давление $|\sigma_3|$. Однако из теории пластичности известно, что среднее главное напряжение при трехосном сжатии стали повышает предел текучести стали незначительно, примерно на 11%. В то же время минимальное главное напряжение $|\sigma_0|$ распределено по толщине стального слоя с градиентом, снижающим величину σ_3 . Из этих соображений трехосное неравномерное сжатие стального слоя в целях упрощения заменено цилиндрическим сжатием (см. (14)).

Общее предельное усилие находится суммированием

$$N_{sc} = N_c + N_s. \quad (15)$$

Что касается достоверности формул (12) и (15), то она отчасти проверена в работе [3], что, разумеется не исключает необходимости дальнейшего экспериментального исследования проблемы.

Заключение. Задачи расчета прочности элементов слоистых сталебетонных конструкций типа "труба в бетоне" могут успешно решаться с помощью алгоритма расчета прочности слоистого сталебетона согласно работе [1].

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукша, Л.К. Алгоритм расчета прочности слоистого сталебетона / Л.К. Лукша, В.В. Тур // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2007. – №1. – С. 106–109.
2. Лукша, Л.К. Гиперболические критерии прочности хрупких материалов / Л.К. Лукша // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. Сб. научных трудов Международного научно-методического межвузовского семинара. – Могилёв: Белорусско-Российский университет, 2005. – С. 29–39.
3. Лукша, Л.К. К расчету прочности трехслойного сталебетона при центральном сжатии / Л.К. Лукша [и др.] // Строительная наука и техника [в печати].

Материал поступил в редакцию 07.04.08

LUKSHA L.K. Account of durability of elements layered сталебетонных of designs such as "A pipe in concrete"

In clause the method of account of durability layered сталебетонных of elements generated for a type "A pipe in concrete" is stated.