

УДК 624.074:[624.012.4+624.014.2]

РОЗРАХУНОК МІСЦЕВОЇ СТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ СТІНОК СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Стороженко Л.І., доктор технічних наук, професор

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Лапенко О.І., кандидат технічних наук

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Мурза С.О. аспірант

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Постановка проблеми. Сьогодні конструктивні рішення, форми перерізів, види арматурних каркасів, методи розрахунку залізобетонних конструкцій із традиційним стержневим армуванням досягли такого рівня розвитку, що подальше їх удосконалення вже не дає суттєвої економії бетону та арматури. Одним із шляхів зменшення металомісткості будівельних конструкцій є застосування конструкцій з зовнішнім армуванням. [3-5]

Значення розрахунку на стійкість для вказаних конструкцій в загальному циклі розрахунків на міцність та жорсткість істотно зросло, оскільки руйнування сталезалізобетонних конструкцій із зовнішнім армуванням найчастіше пов'язане з втратою загальної стійкості або їх окремих конструктивних елементів місцевої втрати стійкості.

Сталезалізобетонні конструкції надзвичайно різноманітні, вони застосовуються при будівництві згинальних і стиснутих конструкцій, плит, їх застосовують при зведенні різноманітних споруд. Сталезалізобетонні конструкції мають багато переваг, але, на нашу думку, основна з них – це можливість виробляти та будувати залізобетонні конструкції без використання опалубки, тому що її функції може успішно виконувати арматура зі сталевих профілів [4].

Аналіз останніх досліджень. Застосування листової арматури в стиснуто-зігнутих конструкціях дозволяє знизити витрати на опалубочні роботи, спростити процес зведення колон, монолітних та збірних покриттів будівель і споруд. Для сталезалізобетонних згинальних конструкцій питання тріщиностійкості (поява і розкриття тріщин) в розтягнутій зоні в процесі експлуатації менш актуальне, а то і зовсім відсутнє. Листове армування виключає застосування багаторядного розташування арматури, що дозволяє економити сталь та значно спрощує процес бетонування. Відкрита частина листової арматури дозволяє спростити конструктивні рішення по підсиленню сталезалізобетонних конструкцій при збільшенні корисного навантаження, а також використовувати листову арматуру в якості закладних деталей стиків, різних комунікацій і обладнання .

Однак при виготовленні згинальних елементів із зовнішнім листовим армуванням необхідно забезпечити надійну роботу щодо зчеплення між сталевим листом та бетоном[4].

Виділення невирішених частин загальної проблеми. Арматура у вигляді сталевих листів дозволяє ефективно використовувати залізобетонні конструкції з великим відсотком армування при обмежених розмірах перерізу. Ці конструкції мають суттєві переваги при проектуванні та будівництві різних будівель і споруд. Але до цього часу не вирішена проблема втрати місцевої стійкості сталевих стінок для таких елементів.

Використовують наближені методи розрахунку, які приводять до зайвих витрат матеріалів, а в деяких випадках і до недостатньої надійності конструкцій. Для підвищення ефективності і більш широкого розповсюдження конструкцій із зовнішнім листовим армуванням необхідна розробка теорії і методів їх розрахунку.

Формулювання цілей статті. Метою даної статті є дослідити стійкість сталевго листа, що з однієї сторони з'єднаний з бетоном.

Виклад основного матеріалу. Сталезалізобетонні конструкції, що зарекомендували себе як надійні та економічні, постійно розвиваються і потребують різнобічного дослідження. Так, багато вже відомо про зігнуті конструкції із зовнішнім листовим армуванням, тоді як стиснуті конструкції майже не досліджувалися. Проведені дослідження стиснутих сталезалізобетонних елементів із листовим армуванням дають змогу зробити висновок, що конструкції ефективно працюють під навантаженням і можуть знайти застосування в промисловому і цивільному будівництві.

Існує цілий ряд конструкцій в яких використовується листове армування. При проектуванні таких конструкцій постає завдання, окрім визначення загальної несучої здатності, розглядати задачу стійкості пластини, що з одного боку контактує з бетоном. Розв'язання такої задачі дасть можливість визначити зусилля при якому в сталезалізобетонних конструкціях буде втрачати стійкість сталевий лист [3, 4].

Розглянемо визначення критичних зусиль, що діють на пластину, та викликають в ній початкові однорідні зусилля N_x^0 , N_{xy}^0 , N_y^0 . Розрахункова схема для цього випадку показана на рисунку 1.

Рівняння нейтральної рівноваги відносно прогину пластини w виведено з системи відомих лінеаризованих рівнянь теорії пружності [1]:

$$K_1 K_2 L_1(w) - L_2(K_1 w_{,xx} + K_2 w_{,yy}) + \nabla_0^4 Q_z - \nabla_0^4 (N_x^0 w_{,xx} + 2N_{xy}^0 w_{,xy} + N_y^0 w_{,yy}) = 0 \quad (1)$$

де L_1 , L_2 , ∇_0^4 – диференційні оператори:

$$\begin{aligned} L_1 &= D_{11} \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 4D_{13} \frac{\partial^4}{\partial x^3 \partial y} + 2(C + D_{33}) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + 4D_{23} \frac{\partial^4}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4}{\partial y^4}; \\ L_2 &= (D_{11} D_{33} - D_{13}^2) \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2(D_{11} D_{23} - D_{12} D_{13}) \frac{\partial^4}{\partial x^3 \partial y} + \\ &+ (D_{33}^2 + 2D_{13} D_{23} + D_{11} D_{22} - C^2) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + 2(D_{22} D_{13} - D_{12} D_{23}) \frac{\partial^4}{\partial x \partial y^3} + \\ &+ (D_{22} D_{33} - D_{23}^2) \frac{\partial^4}{\partial y^4}; \\ \nabla_0^4 &= L_2 - (D_{11} K_2 + D_{33} K_1) \frac{\partial^2}{\partial x^2} - 2(D_{13} K_2 + D_{23} K_1) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - \\ &- (D_{33} K_2 + D_{22} K_1) \frac{\partial^2}{\partial y^2} + K_1 K_2. \end{aligned} \quad (2)$$

При цьому $D_{ij} = c_{ij} h^3 / 12$ ($i, j = 1, 2, 3$); c_{ij} є функціями від E_1 , E_2 , G , ν_1 , ν_2 [1].

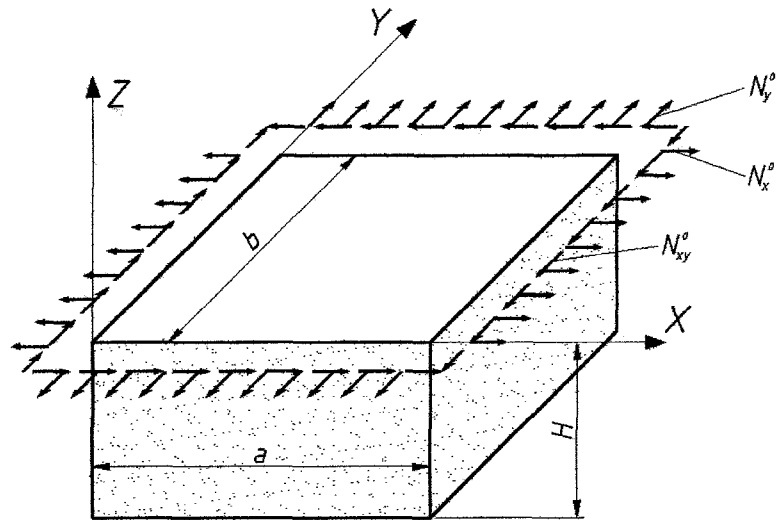


Рисунок 1. Початковий напружений стан пластини на пружній основі.

Труднощі вирішення такої задачі пов'язані з задоволенням граничних умов на поверхнях конструкції та вирішенням складних трансцендентних рівнянь відносно критичних навантажень. Для вирішення окремих задач можна використати наближені методи, які несуттєво впливають на точність результатів.

Залежності φ_x та φ_y від прогину ω наступні:

$$\begin{aligned} \nabla_0^4 \varphi_x &= D_{33} K_1 \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} + (2D_{23} K_1 - D_{13} K_2) \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^2 \partial y} + (D_{22} K_1 - CK_2) \frac{\partial^3 \omega}{\partial x \partial y^2} - \\ &- D_{23} K_2 \frac{\partial^3 \omega}{\partial y^3} - K_1 K_2 \frac{\partial \omega}{\partial x}; \\ \nabla_0^4 \varphi_y &= D_{33} K_2 \frac{\partial^3 \omega}{\partial y^3} + (2D_{13} K_2 - D_{23} K_2) \frac{\partial^3 \omega}{\partial x \partial y^2} + (D_{11} K_2 - CK_1) \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^2 \partial y} - \\ &- D_{13} K_1 \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} - K_1 K_2 \frac{\partial \omega}{\partial y}. \end{aligned} \quad (3)$$

Один з наближених методів заснований на припущенні про слабку залежність величин критичних навантажень від вказаних вище крайових умов. В цьому випадку рішення рівняння (3) можливо прийняти у вигляді:

$$\omega = W_{\alpha\beta} F(\alpha x + \beta y), \quad (4)$$

де α, β – параметри хвилеутворення;

F – функція, що задовольняє рівняння $F'' + \gamma^2 F = 0$, $\gamma^2 = \alpha^2 + \beta^2$.

Тому задачу для стінок сталі залізобетонних елементів розглядаємо, як стійкість прямокутної ортотропної пластини, закріпленої шарнірно, на пружній основі, стиснутій в одному з головних напрямків ортотропії зусиллями N , рівномірно розподіленими по сторонам $x=0, a$. Вважаємо що навантажені кінці конструкції шарнірно оперті.

Тоді відносно навантаження отримаємо вираз:

$$N_x^0 \alpha^2 + 2N_{xy}^0 \alpha \beta + N_y^0 \beta^2 = -\frac{K_1 K_2 L_{\alpha\beta} + (K_1 \alpha^2 + K_2 \beta^2) M_{\alpha\beta}}{M_{\alpha\beta} + N_{\alpha\beta}} - q_{z\alpha\beta}, \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} L_{\alpha\beta} &= D_{11} \alpha^4 + 4D_{13} \alpha^3 \beta + 2(C + D_{33}) \alpha^2 \beta^2 + 4D_{23} \alpha \beta^3 + D_{22} \beta^4; \\ M_{\alpha\beta} &= (D_{11} D_{33} - D_{13}^2) \alpha^4 + 2(D_{11} D_{23} - D_{12} D_{13}) \alpha^3 \beta + \\ &\quad + (D_{33}^2 + 2D_{13} D_{23} + D_{11} D_{22} - C^2) \alpha^2 \beta^2 + \\ &\quad + 2(D_{22} D_{13} - D_{12} D_{23}) \alpha \beta^3 + (D_{22} D_{33} - D_{23}^2) \beta^4; \\ N_{\alpha\beta} &= (D_{11} K_2 - D_{33} K_1) \alpha^2 + 2(D_{13} K_2 - D_{23} K_1) \alpha \beta - \\ &\quad - (D_{33} K_2 - D_{22} K_1) \beta^2 + K_1 K_2; \\ q_{z\alpha\beta} &= 2G_s \gamma \frac{(1 - \nu_s)(sh 2\gamma H - 2\gamma H) + \chi(sh^2 \gamma H - \gamma^2 H^2)}{(3 - 4\nu_s)ch^2 \gamma H + \gamma^2 H^2 + (1 - 2\nu_s)^2 + \chi(sh 2\gamma H - 2\gamma H)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Рішення диференціальних рівнянь, що задовольняє граничним умовам шарнірного обпирання пластини $\omega=0$, $M_x=0$, $\varphi_y=0$, ($x=0, b$), можливо отримати у вигляді рядів Фур'є:

$$\omega = \sum_k \sum_n W_{kn} X_k(\alpha_k x) Y_n(\beta_n y), \quad (7)$$

$$\text{де } X_k = \sin \frac{k\pi x}{a}; \quad Y_n = \sin \frac{n\pi y}{b};$$

$$\alpha_k = \frac{k\pi}{a}; \quad \beta_n = \frac{n\pi}{b} \text{ - параметри хвилеутворення.}$$

Вираз для отримання критичного навантаження отримуємо підстановкою (3) в (1) та інтегруванням за методом Бубнова-Гальоркіна відносно W_{kn} , та умовами:

$$N_x^0 = -N; \quad N_y^0 = 0; \quad N_{xy}^0 = 0.$$

За умови не тривіальності рішення отримаємо рівняння:

$$N = \frac{a^2}{k^2 \pi^2} \left[F\left(\frac{k\pi}{a}, \frac{n\pi}{b}\right) + q_{zkn} \right], \quad (8)$$

де

$$F\left(\frac{k\pi}{a}, \frac{n\pi}{b}\right) = \left[K_1 \left(\frac{k\pi}{a}\right)^2 + K_2 \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \right] \frac{\Delta_{kn}^{(1)}}{\Delta_{kn}^{(2)}} + K_2 \varepsilon_2 \frac{\Delta_{kn}}{\Delta_{kn}^{(2)}} \quad (9)$$

Тут

$$\begin{aligned} \Delta_{kn} &= \alpha_k^4 + 2(2\bar{\mu}_1 + \nu_1) \alpha_k^2 \beta_n^2 + \bar{\mu}_{21} \beta_n^4; \\ \Delta_{kn}^{(1)} &= \alpha_k^4 + (1 - \nu_1 \nu_2 - 2\nu_2 \bar{\mu}_2) \alpha_k^2 \beta_n^2 + \bar{\mu}_1 \beta_n^4; \\ \Delta_{kn}^{(2)} &= \Delta_{kn}^{(1)} + (\varepsilon_2 + \varepsilon_1 \bar{\mu}_2) \alpha_k^2 + (\varepsilon_2 \bar{\mu}_1 + \varepsilon_1) \beta_n^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Проаналізувавши рівняння (8) можна встановити, що мінімальне значення N по відношенню до параметру хвилеутворення n реалізується при $n=1$. в такому випадку критичне навантаження буде визначатися мінімізацією правої частини (8) по відношенню до параметру k .

$$N_{кр} = \min_{(k)} \left\{ \frac{a^2}{k^2 \pi^2} \left[F\left(\frac{k\pi}{a}, \frac{\pi}{b}\right) + q_{zk1} \right] \right\}. \quad (11)$$

Оскільки пластину можна вважати ізотропною, та найчастіше товщина бетону значно більша за товщину сталевго листа. Та використовуючи гіпотези Кірхгофа-Лява, рівняння (11) буде набувати значно простіший вигляд:

$$N_{кр} = \frac{D\pi^2}{b^2} K_x, \quad (12)$$

де

$$K_x = \min_{(k)} \left\{ \frac{(k^2 \mu^2 + 1)^2 + 2\hat{q}\sqrt{1 - k^2 \mu^2}}{k^2 \mu^2} \right\}; \quad (13)$$

$$\mu = b/a.$$

Циліндрична жорсткість:

$$D = \frac{E_s h^3}{12(1 - \nu_s^2)}. \quad (14)$$

Відносна жорсткість пружної основи \hat{q} з умови (13) визначається:

$$\hat{q} = \frac{2(1 - \nu_b)G_b b^3}{(3 - 4\nu_b)\pi^3 D}, \quad (15)$$

де модуль пружності G_b визначається за формулою:

$$G_b = \frac{E_b}{2(1 + \nu_b)}. \quad (16)$$

При дослідженні елементів без поздовжньої арматури стійкість стінки розглядалась, як стійкість пластини на пружній основі, що враховує сумісну роботу бетону та листової арматури. Розрахунки показують, що втрата місцевої стійкості сталевго листа, який сумісно працює з залізобетоном виникає при напруженнях більших за зусилля текучості в сталевому листі. Це означає, що втрата місцевої стійкості відбувається не в пружній, а в пружно-пластичній та в пластичній стадії роботи конструкцій. Втрата стійкості сталевго листа, що сумісно працює з залізобетонною основою, відбувається одночасно з втратою несучої здатності всієї конструкції.

Література

1. Биба В.В. Стиснені сталезалізобетонні елементи з листовим армуванням. Дис. канд. техн. наук. – Полтава, 2006. – 183 с.
2. Ильгамов М.А., Иванов В.А., Гулин Б.В. Расчет оболочек с упругим заполнителем. Изд. «Наука», М.: 1987. – 133 с.

3. Клименко Ф.Е. Сталобетонные конструкции с внешним полосовым армированием.– К.: Будівельник, 1984. – 88с.
4. Стороженко Л.І., Лапенко О.І. Залізобетонні конструкції в незнімній опалубці: Монографія.– Полтава: ПолтНТУ, 2008. –312с.
5. Стороженко Л.І., Лапенко О.І. Проектування й будівництво сталезалізобетонних конструкцій в незнімній опалубці //Міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» – вип. 67. – Київ, НДБК, 2007. – С. 750 -758.5.