

УДК 624.074:[624.012.4+624.014.2]

Лапенко О.І.

## РОЗРАХУНОК ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ В НЕЗНІМНІЙ ОПАЛУБЦІ

Залізобетонні конструкції в незнімній опалубці можуть бути дуже різноманітними [1]. Крім конструктивних ознак (армування трубами, листами чи прокатними профілями), призначенням (колони, балки, плити), вони відрізняються видом напруженого стану (центрального чи позакцентровий стиск, згинання). На сьогоднішній день існують багато способів розрахунку залізобетонних конструкцій, які в певній мірі забезпечують їх надійність при експлуатації. Розрахунок залізобетонних конструкцій в незнімній опалубці може виконуватись наступними методами:

- з використанням розрахункової деформаційної моделі;
- з урахуванням граничних зусиль в бетоні, арматурі і сталі, виходячи з їх пластичної роботи;
- за приведеним до сталі перерізом.

На даний час досить глибоко розроблені та отримали широке розповсюдження чисельні розрахунки несучих конструкцій з використанням методу кінцевих елементів за допомогою ЕОМ. Проблеми розрахунку сталевих залізобетонних конструкцій розглянуті в міжнародному нормативному документі Eurocode 4 [2].

Окремо слід розглянути питання, пов'язані з розрахунком трубобетонних конструкцій. Оскільки роль сталевих труб в трубобетоні зводиться головним чином до стримування поперечного розширення бетонного ядра при стиску елемента, а з теорії міцності бетону відомо, що із підвищенням поперечного стискування (бічного тиску) міцність бетону може значно зростати, то головну роль в несучій здатності трубобетонного елемента повинна виконувати робота сталевих труб в поперечному напрямку. Цього можна досягти шляхом регулювання геометричних і механічних параметрів трубобетонного елемента. Наприклад, трубобетонні елементи з тонкостінними сталевими трубами більш ефективніші, тому що внаслідок потужного дилатаційного ефекту в цих елементах стальна труба чинить опір тільки в поперечному напрямку. Тому в загальному випадку при розрахунку стиснутих трубобетонних елементів слід використовувати формулу

$$N = \alpha R_b A_b + \beta R_s A_s, \quad (1)$$

де  $R_b A_b$  – несуча здатність бетонного ядра при стиску;

$R_s A_s$  – несуча здатність на стиск сталевих труб;

$\alpha, \beta$  – коректувальні коефіцієнти.

Запропоновані методи визначення коефіцієнтів ефективності сталі й бетону  $\alpha$ , і  $\beta$  базуються на теоремах і постулатах механіки суцільного деформованого середовища, у першу чергу на методах теорії пластичності і теорії міцності [3]. Вони враховують особливість роботи труботонного елемента як внутрішньо статично невизначеної системи і особливості опору сталевій труби, яка може бути тонкостінною (опір тільки в поперечному напрямку), а також і товстостінною (опір і в поперечному і в поздовжньому напрямку).

Математичний апарат фундаментальних методів максимально структурований. Він і цілком, і по складовим частинам розрахункової несучої здатності труботонного елемента має чіткий фізичний зміст і не потребує застосування емпіричних коефіцієнтів. Тому фундаментальні методи універсальні, володіють високою точністю і мають аналітично бездоганний завершений вигляд.

При розрахунку позацентрово стиснутих елементів використовується умова

$$N_{pb} = \frac{2\sigma'_s r t_s}{1 + \cos \alpha} \int_{\alpha}^{\gamma} (\cos \alpha - \cos \beta) d_b \beta + 2\sigma'_s r t_s \int_{\gamma}^{\pi} d_b \beta + 2\sigma'_{zb} r^2 \int_{\gamma}^{\pi} \sin^2 \beta d_b - \\ - \frac{2\sigma_y r t_s}{1 + \cos \alpha} \int_0^{\alpha} (\cos \beta - \cos \alpha) d_b \beta + \frac{2\sigma'_{zb} r^2}{1 + \cos \alpha} \int_{\alpha}^{\gamma} (\cos \alpha - \cos \beta) \sin^2 \beta d_b, \quad (2)$$

де  $N_{pb}$  – несуча здатність труботонного елемента;

$\sigma_y$  – границя текучості металу труби;

$r$  – середній радіус труби;

$t_s$  – товщина стінки труби-оболонки.

Положення нейтральної осі (значення кута  $\alpha$ ) вираховується з умови

$$e_0 + r \cos \alpha = M/N.$$

Методика визначення напружено-деформованого стану сталобетонних елементів із листовим армуванням при осьовому стисненні побудована на експериментальних дослідженнях центрально стиснутих зразків. Вважається, що метал та бетон надійно "спаяні" і через цю межу відбувається вплив однієї складової поперечного перерізу на інші. Із графіків залежності поздовжніх та поперечних деформацій від навантаження встановлено, що вони мають криволінійний характер, тобто дослідні зразки працюють як у пружній ( $\approx 60\%$

від руйнівного зусилля), так і в пластичній стадії. Тому ці дві стадії роботи дослідних зразків розглянуті окремо.

У пружній стадії поздовжні та поперечні напруження можна визначити за узагальненими формулами закону Гука, які мають вигляд

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 2G \left( \varepsilon_x + \frac{3\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{cp} \right); \\ \sigma_y &= 2G \left( \varepsilon_y + \frac{3\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{cp} \right); \\ \sigma_z &= 2G \left( \varepsilon_z + \frac{3\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{cp} \right),\end{aligned}\tag{3}$$

де  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – деформації вздовж відповідних осей;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – напруження вздовж відповідних осей;

$$\begin{aligned}G &= \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}; \\ \varepsilon_{cp} &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3};\end{aligned}$$

$E_i, \nu_i$  – модуль пружності та коефіцієнт поперечної деформації  $i$ -го матеріалу;  
 $i = s, sl, b$  – матеріали, які складають поперечний переріз.

У випадку, коли залежність деформацій від навантаження отримує криволінійний характер внаслідок розвитку пружно-пластичних деформацій, напруження визначаються з використанням теорії малих пружно-пластичних деформацій. У цьому випадку залежності між окремими компонентами напружень та деформацій за формою аналогічні пружній стадії, але із заміною постійного модуля пружності  $E$  на змінний модуль деформації  $E'$ . За цією методикою складено розрахункову програму для ПЕОМ.

Розроблена методика розрахунку стиснутих елементів зі сталевих двотаврів із боковими порожнинами, заповненими бетоном. Метод розрахунку за деформованою схемою найбільш точно відображає дійсну картину деформування елементів. Він допускає роботу стиснутих елементів в пружно-пластичній стадії до моменту досягнення граничних деформацій. Згідно цього методу визначається схема деформування геометричної осі елементів під дією навантаження з урахуванням фізико-механічних характеристик кожної елементарної ділянки сталевих двотавра, стержньової арматури та бетону.

Розрахунки сталезалізобетонних стиснутих елементів з урахуванням деформаційної моделі поперечного перерізу елементів в себе включають:

- рівняння рівноваги зовнішніх та внутрішніх сил в нормальному перерізі;
- умови деформування нормального перерізу;

- діаграми стану (деформування) бетону, арматури, сталі.

Для визначення напружено-деформованого стану в нормальному перерізі використовується два відомі рівняння рівноваги:

- рівняння рівноваги проекції всіх сил на поздовжню вісь конструкції;
- рівняння рівноваги моментів відносно якої-небудь вибраної осі в перерізі конструкції, що перпендикулярна площині дії згинаючого моменту.

При розрахунку сталезалізобетонних конструкцій в загальному випадку переріз конструкції розглядається як набір  $m$  елементарних ділянок бетону (з індексом  $i$ ), із  $p$  стержнів арматури (з індексом  $k$ ) та з  $n$  елементарних ділянок сталевих частини конструкцій (з індексом  $j$ ). В цьому випадку рівняння рівноваги мають вигляд:

$$N - \sum_{i=1}^m \sigma_{bi} A_{bi} - \sum_{j=1}^n \sigma_{rj} A_{rj} - \sum_{k=1}^p \sigma_{sk} A_{sk} = 0 ; \quad (4)$$

$$N e - \sum_{i=1}^m \sigma_{bi} A_{bi} y_{bi} - \sum_{j=1}^n \sigma_{rj} A_{rj} y_{rj} - \sum_{k=1}^p \sigma_{sk} A_{sk} y_{sk} = 0 , \quad (5)$$

де  $N$  - зовнішня поздовжня сила;

$e$  - відстань від сили  $N$  до вибраної осі  $O-O$ , що розташована в межах перерізу конструкції, відносно якої визначаються моменти внутрішніх сил в бетоні, сталі та арматурі з урахуванням вигину;

$A_{bi}$ ,  $A_{rj}$ ,  $A_{sk}$  - площа елементарних ділянок відповідно бетону, сталі та арматури;

$y_{bi}$ ,  $y_{rj}$ ,  $y_{sk}$  - відстань від вибраної моментної осі до центра ваги елементарних ділянок (відповідно бетону, сталі та арматури);

$\sigma_{bi}$ ,  $\sigma_{rj}$ ,  $\sigma_{sk}$  - напруження на елементарних ділянках відповідно бетону, сталі та арматури.

Умова деформування нормального перерізу конструкції приймається у вигляді плоского повороту з лінійним розподілом деформацій за висотою перерізу від розглядуваних впливів.

При обрахуванні зусиль в перерізі стиснутого сталезалізобетонного елемента напруження в бетоні, арматурі та сталі визначаються за деформаціями за допомогою діаграм стану матеріалів, що пов'язують напруження з деформаціями. Діаграми стану представляються у вигляді системи вузлових (базових) точок, які визначають найбільш характерні стадії напружено-деформованого стану матеріалів. Параметрами основної базової точки діаграм стану матеріалів є нормативні опори матеріалів і відповідні їм деформації. Значення параметрів додаткових базових точок визначаються як похідні від параметрів основної базової точки.

Параметри основної базової точки, яка відповідає межі пружної роботи арматури, приймаються рівними розрахунковому опору арматури  $\sigma_{so} = R_s$  та відповідній йому деформації:

$$\varepsilon_{so} = \frac{R_s}{E_s}, \quad (6)$$

де  $E_s$  - модуль пружності арматури.

Для сталі приймаються аналогічні значення параметрів базових точок та розрахункові залежності. Діаграми стану сталі та арматури при розтягу та стиску приймаються однаковими.

Розрахунок стиснутих сталезалізобетонних елементів може виконуватись за граничними зусиллями з застосуванням двох умов рівноваги.

Запропоновані методи розрахунку залізобетонних конструкцій в незнімній опалубці, що працюють на згин для всіх типів перерізів, які розглядаються в [1]. Так при розгляданні напружено-деформованого стану залізобетонних елементів із зовнішнім листовим армуванням прийняті відомі передумови:

- дотримується гіпотеза плоских перерізів;
- дотримуються умови статички:

$$\sum N_i = 0; \sum M_i = 0. \quad (7)$$

- опір бетону на розтяг приймається рівним нулю;
- опір бетону на стиск умовно представляється напруженням, рівним  $R_b$ , (помножений, в необхідних випадках на коефіцієнт умов роботи), рівномірно розподіленим по частині стиснутої зони;
- розтягуючі напруження в листовій і стрижневій арматурі приймаються не більше розрахункових опорів розтягу  $R_y$  і  $R_s$ , помноженими, в необхідних випадках, на коефіцієнт умови роботи;
- стискаючі напруження в листовій і стрижневій арматурі приймаються не більше розрахункових опорів на стиск  $R_y$  і  $R_{sc}$ , помноженими в необхідному випадку на коефіцієнт умов роботи.

При випробуванні балок на згин руйнування проходило по нормальному перерізу. Причиною руйнування було досягнення напружень межі текучості сталевий арматури та відшарування вертикальної листовий арматури з подальшим руйнуванням бетону в стиснутій зоні перерізу. Оцінка міцності елементів за граничними станами для вказаних форм руйнування може бути представлена на основі сумісного рішення рівноваги поздовжніх сил в залежності від схеми внутрішніх зусиль. В даному випадку розглядається розрахункова схема нормального перерізу (рисунок 1).

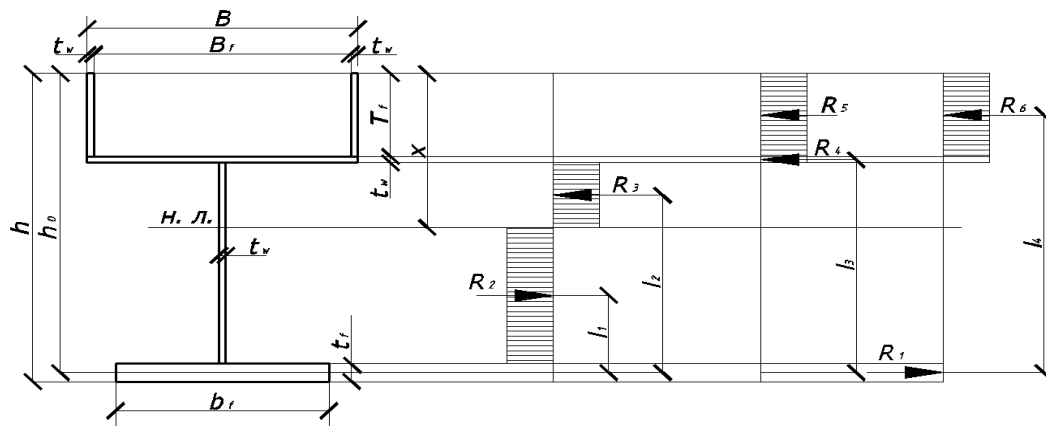


Рис. 1 - Схема внутрішніх зусиль у нормальному перерізі

Умови статички (7):

$$R_y(t_w(h - t_f - 2x + T_f + t_w - B) - T_f(B - B_f)) + R'_y b_f t_f - R_b B_f T_f = 0. \quad (8)$$

$$X = \frac{[R_y(t_w(h - t_f + T_f + t_w - B) - T_f(B - B_f)) + R'_y b_f t_f - R_b B_f T_f]}{2R_y t_w} \quad (9)$$

$$M_p \leq T_f(R_y(B - B_f) + R_b B_f)(h_0 - 0,5t_f) + R_y t_w(B(h_0 - T_f - 0,5t_w) + (x - T_f - t_w)(h_0 -$$

$$T_f - t_w - 0,5(x - T_f - t_w)) - (h - t_f - x)(h_0 - x - 0,5(h_0 - x - 0,5t_f)), \quad (10)$$

Розроблена методика розрахунку згинальних залізобетонних елементів в незнімній опалубці на поперечну силу. При розрахунку елементів з листовим армуванням слід користуватися формулою

$$Q_u \leq \frac{\varphi_{b4} R_{bt} b h_0^2}{c} + 2R_{yw} t_w c. \quad (11)$$

Для розрахунку переміщень згинальних залізобетонних елементів в незнімній опалубці отримана формула

$$f_M = \frac{M_{\text{роз}}}{0,85 \cdot I_{\text{red}} \cdot E_s} \cdot \left( \frac{3l^2 - 4a^2}{24} \right) \quad (12)$$

Запропоновані також формули для розрахунку анкерних засобів, що забезпечують сумісну роботу бетону та сталі в залізобетонних конструкціях в незнімній опалубці.

Розроблені в дисертації алгоритми розрахунку дозволяють з достатньою точністю визначити зусилля руйнування і кривизну сталезалізобетонних стійок і балок та відобразити розподіл деформацій і напружень не лише в бетоні, але й у сталевій арматурі. За розробленою методикою складена програма розрахунку на ЕОМ, яка забезпечує задовільну збіжність з експериментальними даними.

### ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

- 1.Стороженко Л.І.і ін. Залізобетонні конструкції в незнімній опалубці / Л.І.Стороженко, О.І.Лапенко // Полтава: АСМІ, 2008. – 312 с.
- 2.Eurocod 4. Common Unified Rules for Composite Steel and concrete Structures European Committee for Standardization. (CEN) ENV. 1994 – 1-1:1992. – 180 p.
- 3.Стороженко Л.І. і ін.. Сталезалізобетонні конструкції / Л.І.Стороженко, О.В.Семко, В.Ф.Пенц // Полтава: 2005. – 181 с.

### АНОТАЦІЯ.

Розглянуті питання розрахунку стиснутих та зігнутих сталезалізобетонних конструкцій в незнімній опалубці. Зроблений висновок про доцільність використання розрахункової деформаційної моделі, яка найкраще відповідає реальній роботі несучих конструкцій

### АННОТАЦИЯ.

Рассмотрены вопросы расчета сжатых и изогнутых сталежелезобетонных конструкций в несъемной опалубке. Сделан вывод о возможности применения расчетной деформационной модели, которая наиболее полно отвечает реальной работе несущих конструкций.

### ANNOTATION

The considered questions of calculation of the compressed and arcuated steelreinforced concrete constructions are in planking which is not taken off. The done conclusion is about expedience of the use of calculation deformation model which answers the real work of bearings constructions better.