

## НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТРУБОБЕТОННОГО ЕЛЕМЕНТУ ПРИ ОСЬОВОМУ СТИСНЕННІ

Стороженко Л.І., д.т.н., проф., Єрмоленко Д.А., к.т.н., доц.

*Полтавський національний технічний університет  
імені Юрія Кондратюка*

### **Постановка проблеми у загальному вигляді**

На даний час проведені всебічні експериментальні дослідження трубобетону. Робота трубобетонних конструкцій під навантаженням значно відрізняється від роботи сталевих та залізобетонних конструкцій. Металева труба-оболонка в трубобетоні - виконує одночасно функції як поздовжнього, так і поперечного армування. Вона сприймає зусилля за всіма напрямками під будь-яким кутом. Боковий тиск труби опирається інтенсивному розвитку мікротріщин розриву в бетонному осерді, яке в умовах всебічного тиску витримує напруження, що значно перевищують призову міцність. Одночасно сталева труба, що заповнена бетоном, виявляється значною мірою захищеною від утрати як місцевої, так і загальної стійкості. Це пояснюється тим, що сталь і бетон у трубобетонній конструкції знаходяться в умовах об'ємного напруженого стану.

У трубобетонних конструкціях ефективно використовуються специфічні особливості матеріалів, що застосовуються. Це дозволяє отримати значну економію сталі та цементу, призводить до зменшення поперечного перетину елементів конструкцій. Найбільш ефективно це проявляється у центральних стиснутих конструктивних елементах.

Для успішного використання ефективних трубобетонних конструкцій у будівництві з рахуванням їх справжніх властивостей при раціональному сполученні бетону й сталі необхідна надійна теорія оцінки їх роботи в умовах об'ємного напружено-деформованого стану складових матеріалів.

### **Аналіз досліджень і публікацій.**

В роботі [1] зроблений ґрунтовний аналіз розроблених методик оцінки напружено-деформованого стану стиснутого трубобетону. Різноманіття методик розрахунку трубобетонних елементів є основною перешкодою до створення нормативного документа по проектуванню трубобетонних конструкцій.

**Метою роботи** є розробка методики оцінки напружено-деформованого стану стиснутих елементів колового перерізу з урахуванням типу контактної взаємодії між компонентами при передачі осьового навантаження через жорсткий штамп, яка є частковим випадком узагальненого підходу, що побудовано на механічній моделі складеного брусу.

#### **Виклад основного матеріалу досліджень.**

Універсальною моделлю трубобетону є модель складеного тіла. У відповідності до цього розрахункову схему представлено, як систему двох циліндричних тіл – осердя і оболонка. Напружено-деформований стан такої системи тіл вважається повністю визначеним, якщо відомі 15 величин ( $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, u_i$ ) для кожного з компонентів системи.

Прийнято такі передумови: внутрішній компонент представляє собою просторове циліндричне тіло і тому працює в умовах просторового напружено-деформованого стану, а зовнішній – замкнену кільцеву тонку циліндричну оболонку і працює в умовах плоского напруженого стану; в єдине ціле компоненти трубобетону об'єднано за рахунок жорстких в'язей, які безперервно розподілені по контактній поверхні; розглядається процес простого навантаження; до діючих на оболонку навантажень відносяться осьові зовнішні зусилля та внутрішні зусилля, як реакція заповнення (осердя); до діючих на осердя навантажень відносяться осьові зовнішні зусилля та внутрішні зусилля, як реакція оболонки.

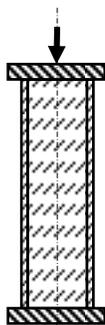


Рис. 1 –

Осьове завантаження трубобетонного елемента

Навантаження  $N$  на трубобетонний елемент передається через жорсткий штамп (рис. 1).

Трубобетонний стрижень складається з суцільного бетонного колового циліндру радіуса  $r_b$  та колової оболонки з радіусом зовнішньої поверхні  $r_s$ , товщиною  $t$ . Нехай  $E_b, \mu_b$  - модуль деформацій і коефіцієнт Пуассона осердя, а  $E_s, \mu_s$  - модуль деформацій і коефіцієнт Пуассона оболонки. На основах до компонентів прикладене зовнішнє навантаження  $+N_s$  (при  $z=0$ ) та  $-N_b$  (при  $z=l$ ).

Методика оцінки напружено-деформованого стану суттєво залежить

від моделі труобобетону. Так при застосуванні моделі складеного тіла необхідно попередньо визначити величину контактних зусиль. Якими в разі осевого стиснення через жорсткий штамп є радіальні ( $W$ ), інтенсивністю  $q_\rho(\varphi, z)$ .

Визначаємо контактні зусилля за методикою [2]. В разі вісьової симетрії невідома інтенсивність контактних зусиль має вигляд:

$$q_\rho(\varphi, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \psi_n(z); \quad (1)$$

де  $\psi_n(z)$ , - функція, яка встановлює характер розподілу зусиль уздовж меридіальної площини.

Окремі складові (1), котрі відповідають певному  $n$  встановлюються за результатами вирішення системи [2]. У зазначеному випадку ця система має вигляд:

$$\Omega_{\rho\rho} q_\rho^n + \Lambda_\rho = 0. \quad (2)$$

Функція  $\psi_n(z)$ , яка апроксимує інтенсивність контактних зусиль уздовж вісі  $z$ , обирається різними способами при умові, що вони лінійно незалежні і відповідають змісту задачі. Де які графіки елементарних рішень наведено на рис. 2.

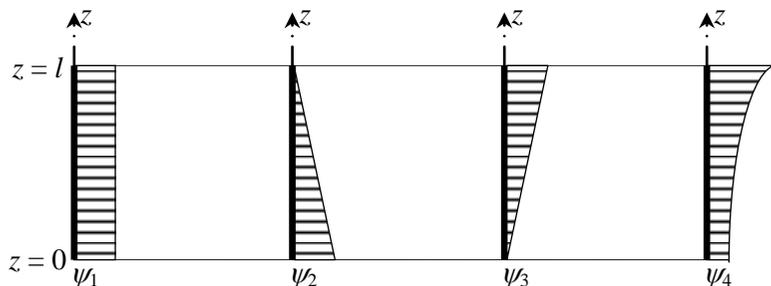


Рис. 2 – Можливі варіанти графіків функції  $\psi_n(z)$ .

Коефіцієнт  $\Omega_{\rho\rho}$  являє собою різницю переміщень односторонніх точок контактної поверхні компонентів труобобетону. Відповідні переміщення  $\delta_{\rho\rho}^{b(s)}$  виникають від дії  $q_\rho(\varphi, z)$ . Функціональна залежність  $\delta_{\rho\rho}^{b(s)}$  залежить від відповідної функції  $\psi_n(z)$ .

Приймаємо графік функції  $\psi_n(z)$  у вигляді постійної лінійної залежності (рис. 2, а). Для розшуку переміщень точок поверхні контакту

бетонного осердя будемо мати на увазі, що в умовах вісесиметричного навантаження через жорсткий штамп переміщення точок осердя в тангенціальному напрямку відсутні, а деформований стан характеризується переміщеннями лише у напрямку радіусу ( $w$ ). Представимо ці переміщення у вигляді

$$\left. \begin{aligned} w(\rho, z) &= w_1(\rho, z) = w_1(z)\psi(\rho); \\ v(\rho, z) &= 0; \quad u(\rho, z) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $w_1(z)$  - невідома функція, яка характеризує величину радіального переміщення  $w(\rho, z)$  при  $z = const$ ;  $\psi(\rho)$  - функція поперечного розподілу радіального переміщення, уздовж вісі  $\rho$ .

Система диференціальних рівнянь [3] складається із одного рівняння першої групи:

$$\frac{\partial^2 w_1}{\partial z^2} a_{11} - (\lambda + 2G)w_1 b_{11} + q_1 = 0. \quad (4)$$

Коефіцієнти диференціальних рівнянь та вільний член мають вигляд:

$$a_{11} = \frac{r_b}{3}; \quad b_{11} = \frac{1}{r_b}; \quad q_1 = q_\rho^{mn}(z)\psi(r_b). \quad (5)$$

Вирішення диференціального рівняння (4) розшукується за допомогою тригонометричного ряду:

$$w_1(z) = \sum_n w_{1n}(z) \cos\left(\frac{n\pi z}{l}\right). \quad (6)$$

Для вирішення задачі про передачу навантаження через жорсткий штамп достатньо прийняти  $n = 1$ .

Після визначення величин коефіцієнтів  $w_{1n}(z)$ , із рівняння (6) встановлюються переміщення в пружному осерді. Тоді напруження пружного осердя в умовах труботону при центральному стисненні через жорсткі штампі визначається за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\rho\rho}^b &= 2 \frac{1}{r_b} (\lambda + G) W_{1n}(z) \cos \frac{\pi z}{l}, \\ \sigma_{\varphi\varphi}^b &= 2 \frac{1}{r_b} (\lambda + G) W_{1n}(z) \cos \frac{\pi z}{l}; \\ \sigma_{zz}^b &= \lambda \left(1 + \frac{1}{\rho}\right) \frac{1}{r_b} (1 + \rho) W_{1n}(z) \cos \frac{\pi z}{l}; \\ \tau_{\rho z}^b &= -G \rho \frac{1}{r_b} W_{1n}(z) \sin \frac{\pi z}{l} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для встановлення напружено-деформованного стану оболонки скористаємось рішенням наведеним в [4], яке вирішено у випадку представлення зовнішнього навантаження на бокову поверхню у вигляді рядів.

Відповідні вирази напружень та переміщень будуть мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\varphi\varphi}^s &= A_o + 2\nu_s B_o + \frac{1}{r_s} \left\{ [A_1 + 2(1-\nu_s)B_1]I_1(\xi r_s) - \right. \\ &\quad \left. - (1-2\nu_s)B_1 \xi r_s I_o(\xi r_s) \right\} \cos(\xi z); \\ \sigma_{zz}^s &= -2(A_o - 2B_o) - \xi \left\{ [A_1 - 2B_1]I_o(\xi r_s) - B_1 \xi r_s I_1(\xi r_s) \right\} \cos(\xi z); \\ \tau_{\varphi z}^s &= -\xi \left\{ A_1 I_1(\xi r_s) - B_1 \xi r_s I_o(\xi r_s) \right\} \sin(\xi z), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де  $\mu$  - коефіцієнти Ляме;  $\xi = \frac{\pi z}{l}$ ;  $A_o = \frac{2q_1 + \nu_s h_1}{2(1 + \nu_s)}$ ;  $B_o = \frac{2q_1 - h_1}{4(1 + \nu_s)}$ ;

$$A_1 = -\frac{1}{\xi D_1^*} \left\{ q_1 (\xi r_s)^2 I_o(\xi r_s) - h_1 \left[ \xi r_s I_o(\xi r_s) - (\xi r_s)^2 I_1(\xi r_s) - 2(1-\nu_s) I_1(\xi r_s) \right] \right\};$$

$$B_1 = -\frac{1}{\xi D_1^*} \left\{ q_1 \xi r_s I_1(\xi r_s) + h_1 \left[ \xi r_s I_o(\xi r_s) - I_1(\xi r_s) \right] \right\};$$

$$D_1^* = (\xi r_s)^2 I_o^2(\xi r_s) - \left[ (\xi r_s)^2 + 2(1-\nu_s) \right] I_1^2(\xi r_s).$$

Таким чином всі компоненти напружено-деформованного стану трубобетону встановлено.

### Висновок з даного дослідження

Наведений у статті матеріал є розвитком роботи [2] і розкриває підхід до оцінки напружено-деформованого стану при осьовому стисненні через жорсткий штамп при застосування моделі складеного тіла до трубобетону.

### Summary

**The article gives the methods of stress-strained state compression concrete filled steel tube value. The man attention is payed to load and forms of contact force distribution between concrete filled steel tube components.**

### *Література*

1. Стороженко Л.І., Єрмоленко Д.А., Лапенко О.І. Труبوبетон: Монографія. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – 306 с.
2. Сумісна робота компонентів в труبوبетонному конструктивному елементі / Стороженко Л.І., Єрмоленко Д.А. // "Вісник національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. Вип.№662 - Львів, "Львівська політехніка, 2010. – С.350-354.
3. Напружено-деформований стан осердя труبوبетонних елементів / Стороженко Л.І., Єрмоленко Д.А. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. науч. трудов. Вып.№56. – Дн-вск., ПГАСА, 2010. – С.504-509.
4. Соляник-Красса К.В. Осесимметричная задача теории упругости. – М.: Стройиздат, 1987. – 336 с.