

О.А. ПАЛИВОДА, асистент, С.О. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф.  
Криворізький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ ОБОЛОНКИ ТА ЯДРА ТРУБОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗІ ЗМІЦНЕНИМ ОСЕРДЯМ

У даний час необхідно посилювати режим економії, ефективність використання ресурсів, знижувати матеріаломісткість в будівництві.

Сучасні будівельні конструкції повинні відповідати всім вимогам економічності, ресурсозбереження, які пред'являються до будівництва. Основний напрямок їх розвитку – це скорочення витрати сталі (14-16 %), економія цементу (10-12%) і економія лісових матеріалів (12-14 %). Ці завдання можна вирішувати, в тому числі і за рахунок зниження матеріаломісткості та зменшення поперечного перерізу конструкцій, за рахунок раціонального поєднання бетону і сталі при їх спільній роботі та за рахунок застосування високоміцних матеріалів. Цим вимогам задовольняють будівельні конструкції з труобетону. При відносно малому поперечному перерізі такі конструкції здатні витримувати значні зусилля, при цьому бетон за рахунок об'ємного напруженого стану сприймає напруги, що значно перевищують призмову міцність, що економить сталь і бетон. Застосовуючи високоміцні бетони, бетони, ущільнені пресуванням, центрифугуванням, можна отримати значну економію цементу, так як за рахунок індустріальних технологічних факторів ущільнення бетонної суміші міцність бетону значно підвищується. Підвищити міцність бетону можна і за рахунок застосування непрямого армування, що дозволяє при малій витраті сталі значно підвищити міцність конструкцій.

Удосконалення відомих ефективних способів зміцнення бетону стосовно труобетонних конструкцій зі зміцненим осердям, придатних до індустріалізації, є актуальною і важливою задачею.

Метою представлених в даній статті досліджень було експериментальне вивчення труобетонних елементів з бетонними ядрами, зміцненими різними методами; розробити методи розрахунку несучої здатності і напружено-деформованого стану труобетонних елементів зі зміцненими ядрами.

**Ключові слова:** труобетон, зміцнене бетонне ядро, сталеве оболонка, напруження, деформації, міцність.

**Проблема та її зв'язок з науковою і практичною задачею.** Будівельна галузь України переживає глибоку кризу. З урахуванням нинішнього стану будівництва та забезпечення його ресурсами, удосконалення труобетонних конструкцій шляхом зміцнення бетону осердя є актуальною і важливою задачею. Серед усіх інших відомих способів - це найбільш ефективний, як технологічно, так і економічно.

**Метою представлених досліджень** є експериментальне вивчення труобетонних елементів зі зміцненим осердям; розробити методи розрахунку несучої здатності та напружено-деформованого стану таких елементів.

**Аналіз досліджень і публікацій.** До теперішнього часу запроєктовано і побудовано багато будівель із застосуванням труобетону. Сталеві труби, заповнені бетоном, застосовуються в Китаї [1-3], Канаді [4; 5], США [6], Японії [7]. У СНД також побудовано ряд оригінальних споруд [8-10]. Труобетон застосовується навіть у таких відповідальних спорудах, як мости [11]. Разом із тим здебільшого дослідження спрямовуються на вплив різнотипного складу бетону ядра на характеристики конструкцій. Ідея ж зміцнення ядра залишається поза увагою дослідників.

**Постановка задачі.** Завдяки ряду специфічних якостей: підвищеної тріщиностійкості, стійкості до ударних і теплових впливів, труобетон набуває все більшого поширення [12-15], у зв'язку з чим експерименти були спрямовані на уточнення механізму розвитку напружено-деформованого стану труобетонних елементів зі зміцненим осердям для більш достовірної та конкретної оцінки їх характеристик.

Відомо, що в стиснутих труобетонних елементах діюче зусилля сприймається як трубною оболонкою, так і бетонним осердям. Якщо якимось чином збільшити несучу здатність осердя, то можна зменшити витрати сталі для отримання труобетонного елемента з наперед заданою несучою здатністю. Тому використання зміцненого осердя забезпечить зниження витрат сталі й економію коштів при виготовленні конструкції, в чому й полягає головна задача дослідження.

**Викладення матеріалу і результати.** Експериментальні дослідження труобетонних елементів з осердям з високоміцним бетоном довели, що до моменту появи текучості в оболонці остання з бетонним осердям працюють паралельно. Тому при розробці методики оцінки напружено-деформованого стану таких конструкцій вважаємо, що труба-оболонка та бетонне

осердя працюють паралельно до того моменту, поки починається текучість труби-оболонки (рис. 1). Надалі бетонне осердя та оболонка працюються сумісно.

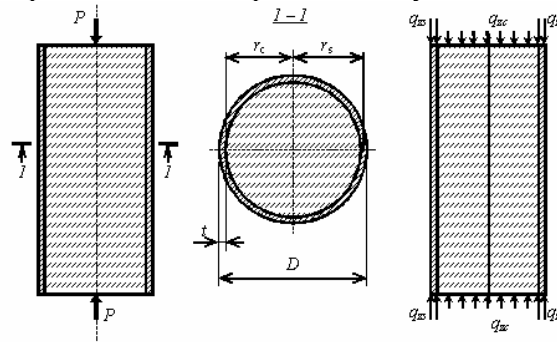


Рис. 1. Розрахункова схема труботонного елемента з осердям з високоміцного бетону

Особливістю деформування дослідних зразків є симетричність відносно центральної вісі. Для зручності напружено-деформований стан описується за допомогою циліндричних координат. В цьому випадку компоненти напружено-деформованого стану не залежать від кута  $\theta$  (рис. 2).

Розглянемо окремо роботу напружено-деформований стан бетонного осердя із високоміцного бетону та сталеві оболонки.

Бетонне являє собою суцільне циліндричне тіло. За умови вісесиметричної задачі його напружено-деформований стан характеризується напруженнями ( $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{rz}$ ), деформаціями ( $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \gamma_{rz}$ ) та переміщеннями ( $u, w$ ). Для їх знаходження використано рівняння рівноваги, геометричні рівняння та рівняння сумісності. Так рівняння рівноваги мають вигляд

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0, \quad (1)$$

де  $\sigma_r$  - нормальні радіальні напруження в напрямку радіусів;  $\sigma_\theta$  - нормальні тангенційні напруження в перпендикулярному напрямку;  $\sigma_z$  - нормальні поздовжні напруження в напрямку вісі  $Z$ ;  $\tau_{rz} = \tau_{rz}$  - дотичні напруження в площині перпендикулярній до вісі  $Z$  та площині паралельній до вісі  $Z$ .

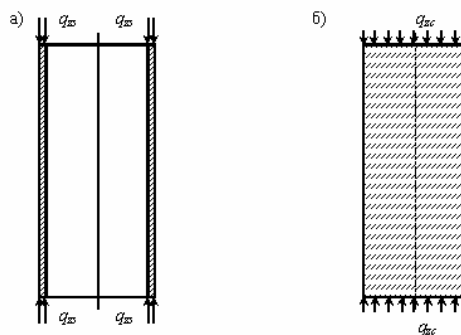


Рис. 2. Розрахункові схеми труби-оболонки (а) та бетонного осердя (б) з високоміцного бетону

Залежність між деформаціями та переміщеннями пов'язані залежностями

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_r$  - деформації в радіальному напрямку;  $\varepsilon_\theta$  - деформації в тангенціальному напрямку;  $\varepsilon_z$  - деформації в напрямку вісі  $Z$ ;  $u$  - переміщення в радіальному напрямку;  $w$  - переміщення в напрямку вісі  $Z$ .

Рівняння сумісності в циліндричних координатах при симетричному розподілі напружень мають вигляд

$$\begin{aligned} \nabla^2 \sigma_r - \frac{2}{r^2}(\sigma_r - \sigma_\theta) + \frac{1}{1+\mu} \cdot \frac{\partial^2 \Sigma}{\partial r^2} = 0; \quad \nabla^2 \sigma_\theta - \frac{2}{r^2}(\sigma_r - \sigma_\theta) + \frac{1}{1+\mu} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Sigma}{\partial r} = 0; \\ \nabla^2 \sigma_z + \frac{1}{1+\mu} \cdot \frac{\partial^2 \Sigma}{\partial z^2} = 0; \quad \nabla^2 \tau_{rz} - \frac{\tau_{rz}}{r^2} + \frac{1}{1+\mu} \cdot \frac{\partial^2 \Sigma}{\partial r \partial z} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ;  $\Sigma = \sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z$  - сума напружень.

Таким чином рівняння (1-3) складають систему рівнянь для опису напружено-деформованого стану бетонного осердя трубобетонних елементів із високоміцного бетону.

Для пошуку вирішення задачі застосуємо функцію напружень  $\varphi$ , яка повинна задовольняти рівняння

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (4)$$

де  $\varphi$  - довільна функція.

Тоді напруження визначаються за формулами

$$\begin{aligned} \sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right); \quad \sigma_\theta = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \nabla^2 \varphi - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right); \quad \sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left( (2 - \mu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right); \\ \tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left( (1 - \mu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right). \end{aligned}$$

У роботі [54] запропоновано використати функцію напружень у вигляді

$$\varphi = z(C_1 r^2 + C_2 z^2)$$

Тоді напруження визначаються за такими формулами

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -2C_1(1 - 2\mu) + 6\mu C_2; \quad \sigma_z = 4C_1(2 - \mu) + 6C_2(1 - \mu); \quad \tau_{rz} = 0,$$

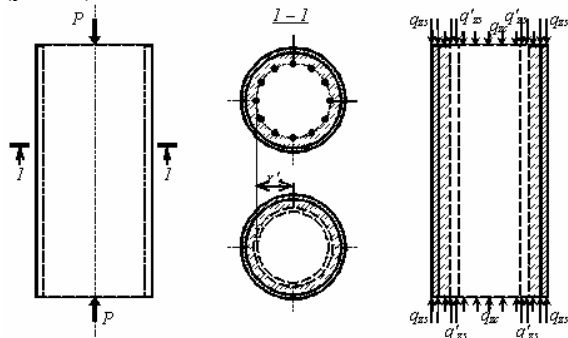
де  $C_1 = \frac{\mu}{2(1 + \mu)} q_z$ ;  $C_2 = \frac{1 - 2\mu}{6(1 + \mu)} q_z$ ;  $q_z$  - інтенсивність зовнішнього зусилля уздовж вісі  $Z$  на крайніх перерізах бетонного осердя.

Після підстановки  $C_1$  та  $C_2$  отримуємо напруження  $\sigma_r = \sigma_\theta = \tau_{rz} = 0$ ,  $\sigma_z = q_z$ .

Труба оболонка являє собою поле циліндричне тіло зі тонкою стінкою. Поперечною деформацією уздовж її радіусу можна знехтувати. Тому для опису напружено-деформованого стану замінюємо оболонку циліндричною поверхнею, яка проходить через середній радіус. Розрахунок виконується як для порожньої труби за методикою [139].

*Трубобетонні елементи з осердям, що армовані поздовжньою арматурою*

Особливістю такого роду трубобетонних елементів є те, що бетонне осердя додатково у поздовжньому напрямку армовано додатковою арматурою. Тобто в поздовжньому напрямку опирається бетонне осердя та сталева арматура, а у поперечному лише бетонне осердя. Для можливості теоретично описати роботу стрижневого армування в умовах трубобетону враховано той факт, що стрижні розташовано рівномірно по колу. Тому в поперечному перерізі стрижневе армування представлено у вигляді умовного кільця з можливістю вільно деформуватися бетону (рис. 3).



**Рис. 3.** Розрахункова схема трубобетонного елемента з осердям, що армовані поздовжньою арматурою

Оцінка напружено-деформованого стану таких конструкцій схожа до методики для трубобетонні елементи з осердям з високоміцного бетону. Лише додається у поздовжньому напрямку робота додаткового армування, яке працює в умовах одновісного напруженого стану.

*Трубобетонні елементи з багатшаровим осердям*

Утворювати багат шарові перерізи стиснутих трубобетонних елементів можна різними шляхами. Тому варто виділити спільні в усіх цих випадках. Так бетонне ядро у загальному випадку представляє собою порожній товстостінний циліндр. Залежно від конструкції цей циліндр може бути завантажений не тільки зі сторони крайніх перерізів, а також і з бокових сторін.

Знайдемо напруження в бетонного осердя. У найбільш узагальненому вигляді таке осердя представляємо у вигляді циліндричного тіла із порожниною у середині (рис. 4).

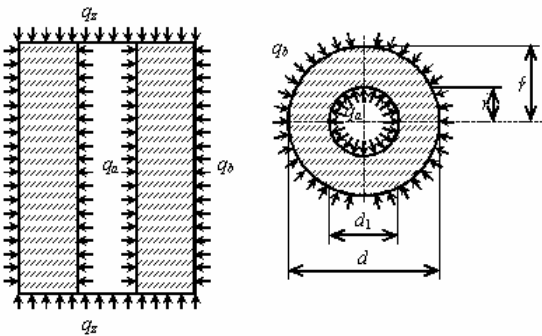


Рис. 4. Розрахункова схема бетонного осердя кільцевого перерізу в багат шарових трубобетонних елементах

На зазначений елемент діє рівномірний тиск по чотирьох поверхнях: тиск із внутрішньої сторони -  $q_a$ ; тиск із зовнішньої сторони -  $q_b$ ; тиск на верхню та на нижню основи -  $q_z$ .

В якості функції напружень приймаємо поліном третього ступеня. В роботі [Жемочкин] вказується, що така функція задовольняє рівнянню (4)

$$\varphi = C_1 \cdot z \cdot \ln r + C_2 \cdot r^2 \cdot z + C_3 \cdot z^3, \quad (5)$$

При цьому напруження дорівнюють

$$\sigma_r = \frac{C_1}{r^2} - 2C_2(1-2\mu) + 6\mu C_3; \quad \sigma_\theta = -\frac{C_1}{r^2} - 2C_2(1-2\mu) + 6\mu C_3;$$

$$\sigma_z = 4C_2(2-\mu) + 6C_3(1-\mu); \quad \tau_{rz} = 0.$$

Для визначення коефіцієнтів  $C_1$ ,  $C_2$  та  $C_3$  задаємо умови на поверхні. На бокових поверхнях та на основах дотичні напруження дорівнюють нулю. Але відрізняються від нуля нормальні напруження на цих поверхнях. Так на бокових поверхнях:

$$\sigma_{r(r=a)} = -q_a; \quad \sigma_{r(r=b)} = -q_b.$$

На основі  $\sigma_z = -q_z$ ,

Так отримуємо три рівняння для знаходження невідомих коефіцієнтів  $C_1, C_2, C_3$

$$\frac{C_1}{r_a^2} - 2C_2(1-2\mu) + 6\mu C_3 = -q_a; \quad \frac{C_1}{r_b^2} - 2C_2(1-2\mu) + 6\mu C_3 = -q_b; \quad 4C_2(2-\mu) + 6C_3(1-\mu) = -q_z;$$

Після вирішення із цих рівнянь отримано коефіцієнти

$$C_1 = \frac{-r_a^2(q_b + q_a)}{\left(1 + \frac{r_a^2}{r_b^2}\right)}; \quad C_2 = \frac{1}{(2-\mu)\left(1 + \frac{1}{9(1-\mu)}\right)} \left[ \frac{\mu q_z}{(1-\mu)} + \frac{r_a^2(q_b + q_a)}{r_b^2\left(1 + \frac{r_a^2}{r_b^2}\right)} - q_b \right];$$

$$C_3 = -\frac{q_z}{6(1-\mu)} - \frac{2}{3(1-\mu)\left(1 + \frac{1}{9(1-\mu)}\right)} \left[ \frac{\mu q_z}{(1-\mu)} + \frac{r_a^2(q_b + q_a)}{r_b^2\left(1 + \frac{r_a^2}{r_b^2}\right)} - q_b \right];$$

Тоді напруження дорівнюють

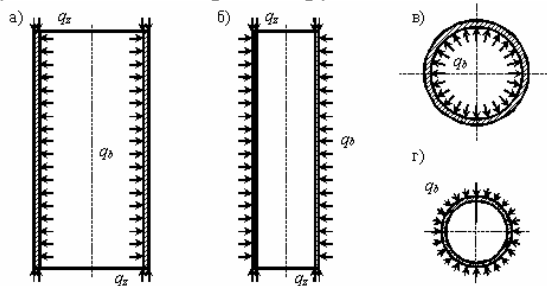
$$\sigma_r = \frac{r_a^2(q_b + q_a)}{r_b^2\left(1 + \frac{r_a^2}{r_b^2}\right)} - \frac{\mu q_z}{(1-\mu)} - \frac{2}{\left(1 + \frac{1}{9(1-\mu)}\right)} \left[ \frac{(1-2\mu)}{(2-\mu)} + \frac{2}{1-\mu} \right] \left[ \frac{\mu q_z}{(1-\mu)} + \frac{r_a^2(q_b + q_a)}{r_b^2\left(1 + \frac{r_a^2}{r_b^2}\right)} - q_b \right];$$

$$\sigma_\theta = -\frac{C_1}{r^2} - 2C_2(1-2\mu) + 6\mu C_3; \quad \sigma_z = -q_z; \quad \tau_{rz} = 0.$$

Підставляючи рівняння напружень у рівняння Гука, знайдемо відносні деформації уздовж вісі Z

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)].$$

Сталеві оболонки в багат шарових трубобетонних елементах можуть розташовуватись, як на зовні, так і додатково всередині. На рис. 5 наведено розрахункові схеми сталевих труб в умовах багат шарових трубобетонних елементів.



**Рис. 5.** Розрахункова схема труби-оболонки в багат шарових трубобетонних елементах: *а* – зовнішня труба-оболонка; *б* – внутрішня труба-оболонка; *в* – поперечний переріз зовнішньої труби-оболонки; *г* – поперечний переріз внутрішньої труби-оболонки

Для можливості побудови методики оцінки напружено-деформованого стану сталеві труби необхідно врахувати декілька факторів: розрахунок трубобетону виконується за ітераційною методикою зі зміною параметрів пружності; в межах окремого етапу розрахунку роботу сталеві труби вважаємо пружною; напружено-деформований стан труби вважаємо сумою станів при простих завантаженнях. Так в якості простих завантажень приймаємо: поздовжній стиск; рівномірний внутрішній стиск; рівномірний зовнішній стиск. Для цього використаємо відомі результати з роботи [139].

#### Список літератури

1. **Shen Xi-ming.** Design of Concrete Pilled Steel Tubular Column for Factory Building. Proceedings. The international speciality conference on concrete filled steel tubular structures. Held at Harbin, China, 1985. - p. 164-170.
2. **Zhong Shan-tong.** The Use of Concrete Filled Steel Tubular Structures in China. - Proceedings. The international speciality conference on concrete filled steel tubular structures. Held at Harbin, China, 1995. - p. 1-6.
3. **Potyondy J.G.** Concrete Pilled Tubular Steel Structures In Marine Environment. Proceedings. The international speciality conference on concrete filled steel tubular structures. Held at Harbin, China, 1985. - p. 27-31.
4. **Furlong R.W.** Asco M. - Desing of Steel-Encased Concrete Beam-Columns. "Proceeding ASCE", №. St. 13, 1998, vol. 94, p 267-281.
5. **Furlong R.W.** - Strength of Steel-Encased Concrete Beam-Columns. "Proceedings ASCE", №.St.1, 1969, vol 95. - p. 99-107.
6. **Gardner K.J. Jacobson E.R.** Structural Behavior of Concrete Pilled Steel Tubes as Columns. - J. Amer. Concrete Inst. Proc., 1967, vol. 64, n 7. - p. 404-413.
7. Практика и перспективы применения трубобетона: <http://snt.com.ru/praktika-i-perspektivy-primeneniya-trubobetona>
8. **Санжаровский Р.С.** Трубобетонные конструкции в строительстве // Промышленное строительство. - 1999. - № 5. - С. 22-23.
9. Современный трубобетон: [http://imet-group.com/?page\\_id=388](http://imet-group.com/?page_id=388).
10. **Расул Хамиев.** Трубобетон – технология будущего. <http://builder.kz/surveys/detail.php?ID=4386>
11. Уникальный железнодорожный мост через реку Исеть. <http://900igr.net/kartinki/geografija/Kamensk-Uralskij/024-ZHeleznodorozhnyj-most.html>
12. **Jejcic D. Zanghellini J.** Mortiers et ciments armes de fibres. - Annales de l'institut technique du batiment et des travaux publies. 1977. Nr. 347. - p. 45-87.
13. Steel fibrons shotcrete. "Tunnele and tunneling", 1995, № 4. - P. 74-75.
14. **Snyder M.J., Lankard D.R.** Factors affecting the flexural strength of steell fibrons concrete. - "ACI Journal", 1972, n 2. - "Proceeding", vol 69. - p. 96-100.
15. **Hannant O.I.** Steel fibre reinforced concrete. - Prospects Fibre Renforc. Constr. Mater. London, 1972. - p. 47-53.
16. **Hummel A.** La technologie du beton à trente resistance. Revue des Mater aux. n 474, 1955.
17. **Sakino K., Tomii M., Watanate K.** Sustaining Load Capacity of Plain Concrete Stub Columns Confined by Circular Steel Tube. Proceeding. The international speciality conference on concrete filled steel tubular structures. Held at Harbin, China, 1985. - p. 112-118.
18. [http://www.expert.ru/printissues/expert/2008/09/oni\\_ne\\_vidyat/](http://www.expert.ru/printissues/expert/2008/09/oni_ne_vidyat/)
19. **Стороженко Л.И.** Расчёт трубобетонных конструкций / **Л.И. Стороженко, П.И. Плехотный, А.Я. Черный.** – К.: Будівельник, 1991. – 120 с.

Рукопис подано до редакції 17.04.15