

## СУМІСНА РОБОТА КОМПОНЕНТІВ У ТРУБОБЕТОННОМУ КОНСТРУКТИВНОМУ ЕЛЕМЕНТІ

© Стороженко Л.І., Єрмоленко Д.А., 2010

**Розглянуто методику оцінки контактної взаємодії між компонентами трубобетону при дії зовнішнього навантаження на основі моделі складеного тіла. Розв'язок знайдено у вигляді тригонометричних рядів.**

**Ключові слова:** трубобетон, складене тіло, контактне зусилля.

**In the article it's considered methods of appreciation of contact interaction between concrete filled steel tube components under the influence of external load based on model of compound solid. The solution is searched in a form of trigonometrical series.**

**Keywords:** concrete filled steel tube, compound solid, contact force.

**Постановка проблеми.** Сучасний рівень будівельного виробництва ставить до несучих конструкцій вимоги щодо високої надійності у поєднанні з малою матеріалоемністю і низькими трудовими витратами під час виготовлення і монтажу. Цим вимогам повною мірою відповідають трубобетонні конструкції та окремі конструктивні елементи.

Трубобетон є комплексним елементом, який складений з двох компонентів – зовнішній (оболонка) та внутрішній (осердя). При порівняно малому поперечному перерізі такі конструктивні елементи здатні витримувати великі зусилля, а бетон у таких конструкціях за рахунок об'ємного напруженого стану сприймає поздовжні напруження, що значно перевищують його призмове міцність. Це дає змогу раціональніше використовувати міцнісні властивості матеріалів і забезпечує економію цементу і сталі.

Поєднання сталеві оболонки і бетонного осердя в одному конструктивному елементі приводить до значного перевищення спільної несучої здатності над сумарною. Це зумовлено сумісною роботою компонентів при завантаженні. Така робота декількох тіл супроводжується взаємною їх дією один на одного. Взаємодія виявляється додатковими силовими факторами, крім зовнішнього навантаження, яке діє на систему зовні. Зі статичного погляду додатковий вплив окремих компонентів призводить до того, що кожен з них в процесі завантаження перебуває у складному напружено-деформованому стані. Навіть при простому завантаженні – центральному стисненні, трубобетон зазнає декілька напружено-деформованих станів [1].

У випадках складного завантаження трубобетону ускладнюється і напружений стан. З'являються одночасно зони розтягу та зони стискання, зони часткового відриву компонентів тощо. Істотно на це впливає ексцентриситет прикладення навантаження та спосіб передачі навантаження на трубобетонний елемент [2].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Як основу моделювання роботи трубобетону під навантаженням різні дослідники застосовують різні механічні моделі. Їх аналіз розглянуто в [3]. В роботі зроблено висновок про те, що універсальною моделлю трубобетону є модель складеного тіла. Ширше це питання розглянуто в [7].

**Формулювання цілі статті.** Оцінити напружено-деформований стан трубобетонного елемента на основі моделі складеного бруса в пружній стадії можна за допомогою апарату теорії пружності, але з додаванням умов спряження окремих компонентів. Ці умови доповнюють граничні умови для кожного з компонентів окремо. Формулювання таких умов можливе лише після встановлення величини контактної зусилля між компонентами при їх сумісній роботі.

**Виклад основного матеріалу.** У цій роботі розглядається методика оцінки сумісної роботи оболонки із заповненням в пружній стадії роботи. При цьому з великого розмаїття форм циліндричних оболонок, їх механічних властивостей, діючих навантажень тощо вибираємо труботонні елементи кільцевого перерізу, які завантажено стискаючим зусиллям і/або крутним моментом, прикладеними до крайніх поперечних перерізів (основ). Розглядаються короткі труботонні конструктивні елементи.

При розрахунку приймаємо такі передумови:

- внутрішній компонент являє 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;
- геометрія зовнішнього компонента описується геометрією середньої поверхні і до нього застосовуються всі головні гіпотези з теорії оболонок;
- в єдине ціле компоненти труботону об'єднано за рахунок жорстких в'язей.

Труботонний брус із в'язями між компонентами являє собою статично невизначену систему. Невідомими тут є зусилля у радіальних ( $W$ ), тангенціальних ( $T$ ) і вертикальних ( $V$ ) в'язях на контактній поверхні, які розшукуються за умов нерозривання деформацій компонентів труботону по поверхні контакту. Цей метод аналогічний до методу зусиль, який широко застосовується в будівельній механіці статично невизначених стрижньових систем. Вважатимемо ці в'язі безперервно розподіленими по спільній (контактній) поверхні між компонентами труботону. Основною системою вибираємо складений стрижень, який позбавлено в'язей, дію котрих замінюємо на невідомі зусилля. В загальному випадку ці невідомі є функціональними, тому що їх величина залежить від координат  $\varphi$  та  $z$ .

Під час розв'язання практичних задач замінюємо дійсне зовнішнє навантаження еквівалентною йому системою навантажень, яка складається з трьох компонентів: 1) зусилля  $P$ , нормальне до основ і прикладене в центрі ваги відповідного компонента труботону; 2) момент  $M_{\rho z}$ , який діє у меридіальній півплощині  $R_0$ ; 3) момент  $M_{\kappa\rho}$ , який діє у площині основи. Характер зусилля вважатимемо розподіленим по вантажній площі, яка становить частку (в окремому випадку дорівнює їй) площі основи відповідного компонента.

До навантажень, що діють на оболонку, належать осьові зовнішні зусилля та внутрішні зусилля як реакція заповнення (осердя). До навантажень, що діють на осердя, належать осьові зовнішні зусилля та внутрішні зусилля як реакція оболонки.

Розв'яжемо задачу окремо для кожного з цих навантажень. Отже, будемо розв'язувати три прості задачі: центральний стиск; згин; кручення. Розв'язання для дійсного навантаження (наприклад, позацентровий стиск) знайдемо додаванням розв'язків, які отримано для кожного із компонентів навантаження відокремлено.

Робота в'язей між компонентами має двосторонній або односторонній характер. Позначимо рівнодіючу контактного зусилля через  $q(\varphi, z)$ , а її компоненти за напрямком осей  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$  через  $q^W(\varphi, z)$ ,  $q^T(\varphi, z)$  і  $q^V(\varphi, z)$ . Для встановлення вигляду епюри контактних зусиль застосуємо обернену задачу. Задаватимемось виглядом функції  $q(\varphi, z)$  і досліджувати, якому випадку вона відповідає. При цьому інтенсивність компонентів реактивного зусилля, які припадають на одиницю площі контактної поверхні, позначимо через  $q_\rho(\varphi, z)$ ,  $q_\varphi(\varphi, z)$  і  $q_z(\varphi, z)$  відповідно.

Невідомі напруження визначаються з умови рівності просторових переміщень відповідних точок спільної поверхні осердя й оболонки [4]. Розділимо труботонний елемент по цій поверхні на два компоненти і додамо три урівноважені системи напружень, які повинні забезпечити рівні відповідні переміщення. Крім того, потрібно ставити умови періодичності, тобто вимагати, щоб зусилля і переміщення повертались до початкових значень після обходу контактної поверхні по

будь-якому поперечному перерізу. Для забезпечення циклічності невідомі закони розподілу реактивних зусиль на квадратну одиницю контактної поверхні шукатимемо у вигляді подвійних тригонометричних рядів при  $\rho = r^{(b)} = const$  :

$$q_\rho(\varphi, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_{mn} \cos(m\varphi) \psi_n(z); \quad (1)$$

$$q_\varphi(\varphi, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_{mn} \sin(m\varphi) \chi_n(z); \quad (2)$$

$$q_z(\varphi, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_{mn} \cos(m\varphi) \zeta_n(z), \quad (3)$$

де  $\alpha_{mn}$ ,  $\beta_{mn}$ ,  $\gamma_{mn}$  – коефіцієнти ряду розкладання;  $m$  – номер члена розкладання по криво-лінійному перерізу;  $n$  – номер члена розкладання уздовж меридіальної площини;  $\psi_n(z)$ ,  $\chi_n(z)$ ,  $\zeta_n(z)$  – функції, які встановлюють характер розподілу уздовж меридіальної площини.

Початок координат розмістимо в центрі середнього поперечного перерізу, спрямувавши вісь  $z$  уздовж трубобетонного елемента.

Залежно від умов конкретної практичної задачі встановлюємо, які з компонентів (1)–(3) контактного зусилля діють на спільній поверхні. Для кожного з  $q_i(\varphi, z)$ , відповідно до принципу незалежності дії зусиль, розглядатимемо вплив кожного члена розкладання окремо, приймаючи, що коефіцієнти дорівнюють одиниці. Так, наприклад, в роботі [5] при центральному стисненні основна схема включає радіальні і поздовжні невідомі контактні зусилля. Автори обмежились лише першими членами відповідних розкладень. До того ж не враховано дії радіальних зусиль на переміщення у вертикальному напрямку та вертикальних зусиль на переміщення у радіальному напрямку.

Для забезпечення урівноваженості системи симетричні члени розкладання розглядаються незалежно, а антисиметричні (з синусами) – попарно, по два суміжні члени ряду.

Задаючись функцією  $q_i(\varphi, z)$  у вигляді подвійного тригонометричного ряду, отримаємо цілий ряд розв'язків. Виконаємо обчислення, вважаючи по черзі всі члени розкладання, крім будь-якого одного, такими, що дорівнюють нулю. Отримавши ряд елементарних розв'язків, шукатимемо розв'язки окремих практичних задач, підбираючи комбінації елементарних.

Для виведення рівнянь необхідно розглянути три елементарні стани основної системи від невідомих зусиль контакту, прикладених до спільної поверхні, і одного стану від заданого навантаження. Кожне рівняння виражатиме умови, що сумарне переміщення по напрямку будь-якого зусилля  $q_i(\varphi, z)$  від сумісної дії всіх контактних зусиль і від дії зовнішнього навантаження дорівнює нулю. Розв'язавши основну систему за усіма елементарними станами, тобто виразивши просторові  $u(\varphi, z)$ ,  $v(\varphi, z)$ ,  $w(\varphi, z)$  переміщення у функціях невідомих зусиль контакту і заданого навантаження за допомогою накладання цих станів, перейдемо від основної системи до розрахункової. Прирівнюємо до нуля переміщення, які виникають від дії всіх невідомих контактних зусиль та навантажень, отримаємо для кожного з елементарних розв'язків три рівняння:

$$\begin{aligned} \Omega_{\rho\rho} q_\rho^{mn} + \Omega_{\rho\varphi} q_\varphi^{mn} + \Omega_{\rho z} q_z^{mn} + \Lambda_\rho &= 0; \\ \Omega_{\varphi\rho} q_\rho^{mn} + \Omega_{\varphi\varphi} q_\varphi^{mn} + \Omega_{\varphi z} q_z^{mn} + \Lambda_\varphi &= 0; \\ \Omega_{z\rho} q_\rho^{mn} + \Omega_{z\varphi} q_\varphi^{mn} + \Omega_{zz} q_z^{mn} + \Lambda_z &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\Omega_{ij}$  – узагальнене переміщення точок контактної поверхні уздовж  $i$ -ї вісі ( $i = j = \{\rho, \varphi, z\}$ ) від узагальненого зусилля  $q_j^{mn} = 1$  і за фіксованого значення  $m$  та  $n$ ;  $\Lambda_{ip}$  – узагальнене переміщення точок контактної поверхні уздовж  $i$ -ї вісі від зовнішніх зусиль;  $q_i^{mn}$  – інтенсивність контактних зусиль, які відповідають одному члену розкладання (1)–(3) при фіксованому значенні  $m$  та  $n$ .

На відміну від задач будівельної механіки стрижневих систем, невідомі контактні зусилля є функціональними невідомими.

За узагальнену одиничну групу невідомих зусиль приймаємо систему напружень, яка відповідає одному члену розкладання.

Як узагальнену епюру переміщень розглядаємо групову епюру як різницю двох епюр (одна епюра переміщень осердя, друга – оболонки). Навантаження, які відповідають цим епюрам, мають зворотно-протилежний напрямок для осердя і для оболонки.

Коефіцієнти  $\Omega_{ij}$  в (4) є функціями координат, і складаються з двох складових: 1) переміщення точок бокової поверхні осердя  $(\delta_{ij}^{(b)}, \Delta_{ij}^{(b)})$ ; 2) переміщення точок серединної поверхні оболонки  $(\delta_{ij}^{(s)}, \Delta_{ij}^{(s)})$ :

$$\Omega_{ij} = \delta_{ij}^{(b)} + (-\delta_{ij}^{(s)}) = \delta_{ij}^{(b)} - \delta_{ij}^{(s)}; \quad (5)$$

$$\Lambda_{ip} = \Delta_{ip}^{(b)} + (-\Delta_{ip}^{(s)}) = \Delta_{ip}^{(b)} - \Delta_{ip}^{(s)}; \quad (6)$$

де  $\delta_{ij}^{(k)}$  – переміщення точок контактної поверхні  $k$ -го компонента ( $k = \{b, s\}$ ) трубобетону уздовж  $i$ -ї вісі від узагальненого зусилля  $q_j^{mn} = 1$  і за фіксованого значення  $m$  та  $n$ ;  $\Delta_{ip}$  – переміщення точок контактної поверхні  $k$ -го компонента трубобетону уздовж  $i$ -ї вісі від зовнішніх зусиль.

Свою чергою, переміщення  $\delta_{ij}^{(k)}$  являють собою епюри переміщень. Але, беручи до уваги той факт, що уздовж поперечного перерізу контактна поверхня має циклічну залежність, відповідно до [6] ці епюри мають такий характер:

$$\delta_{M, \rho j}^{(k)} = \delta_{0, \rho j}^{(k)} \cos(m\varphi) \psi_n(z); \quad (7)$$

$$\delta_{M, \varphi j}^{(k)} = \delta_{0, \varphi j}^{(k)} \cos(m\varphi) \chi_n(z); \quad (8)$$

$$\delta_{M, z j}^{(k)} = \delta_{0, z j}^{(k)} \sin(m\varphi) \zeta_n(z), \quad (9)$$

де  $\delta_{M, ij}^{(k)}$  – переміщення точки  $M(\varphi, z)$ , розташованої на поперечному перерізі контактної поверхні з  $z = const$ ;  $\delta_{0, ij}^{(k)}$  – переміщення точки, розташованої на поперечному перерізі контактної поверхні з координатами  $(0, z)$ , яка належить нульовому меридіану.

Компоненти трубобетону є ізотропними тілами, тоді переміщення в напрямку кожного невідомого зусилля будуть не тільки в місці прикладання елементарного зусилля  $dq_i$ , а і за межами ділянки  $dF$  поверхні контакту. В (7)–(9) переміщення точок нульового меридіана дорівнюють:

$$\delta_{0, \rho j}^{(k)} = 2r^{(k)} \int_0^{l} \int_0^{\pi} q_{\rho}(\varphi, z) \cdot \eta_{\rho}^{(k)}(\varphi, z) d\varphi dz; \quad (10)$$

$$\delta_{0, \varphi j}^{(k)} = 2r^{(k)} \int_0^{l} \int_0^{\pi} q_{\varphi}(\varphi, z) \cdot \eta_{\varphi}^{(k)}(\varphi, z) d\varphi dz; \quad (11)$$

$$\delta_{0, z j}^{(k)} = 2r^{(k)} \int_0^{l} \int_0^{\pi} q_z(\varphi, z) \cdot \eta_z^{(k)}(\varphi, z) d\varphi dz, \quad (12)$$

де  $\eta_i^{(k)}(\varphi, z)$  – поверхня впливу радіального, тангенціального та вертикального переміщення точки нульового меридіана від відповідних одиничних зусиль, які відповідають цьому члену розкладання.

Функції  $\eta_i^{(k)}(\varphi, z)$  відомі для кожного члена розкладання. Їх форма встановлюється методами теорії пружності.

Вільні члени  $\Delta_{ip}$  у рівняннях (4) являють собою узагальнені переміщення точок спільної поверхні компонентів від дії зовнішнього навантаження. Вони встановлюються для кожного окремого виду діючого зусилля ( $P$ ,  $M_{pz}$ ,  $M_{kp}$ ), залежно від умов конкретної задачі.

**Висновок.** Отриманий розв'язок задачі про визначення величини контактних зусиль між компонентами трубобетону є наближеним і досягнення необхідної точності можливе за рахунок включення більшої кількості членів розкладання (1)–(3).

1. Лукаш Л.К. Прочность трубобетона. – Мн.: Вышэйша школа, 1977. – 96 с. 2. Вплив типу контактної взаємодії між компонентами на міцність стиснутих трубобетонних елементів / Стороженко Л.І., Лапенко О.І., Єрмоленко Д.А. // *Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. науч. трудов. Вып. № 50. – Дн-вск, ПГАСА, 2009. – С. 544–549.* 3. Єрмоленко Д.А. Об'ємний напружено-деформований стан трубобетону / Збірник наукових статей “Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація”. – Кривий Ріг, 2008. – Вип. 8. – С. 322–327. 4. Власов В.З., Леонтьев Н.Н. Балки, плиты и оболочки на упругом основании – М.: Гос изд-во физ.-мат. лит-ры, 1960. – 492 с. 5. Чихладзе Э.Д., Веричева М.А. Напряженно-деформированное состояние цилиндрической сталежелезобетонной колонны при осевом сжатии // *Будівельні конструкції. – К.: НДІБК, 2006. – Вип. 67. – С. 389–399.* 6. Вайнберг Д.В., Чудновский В.Г. Расчет пространственных рам. – К.: Госстройиздат УССР, 1964. – 308 с. 7. Стороженко Л.І., Єрмоленко Д.А., Лапенко О.І. Трубобетон: Монографія. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – 306 с.

УДК 624.015.5

Л.І. Стороженко, О.А. Крупченко

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

## СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННІ БАЛКИ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОННИМ ВЕРХНІМ ПОЯСОМ

© Стороженко Л.І., Крупченко О.А., 2010

Запропоновано нову конструкцію – сталезалізобетонну двотаврову балку із залізобетонним верхнім поясом та послідовність її виготовлення. Наведено чотири типи з'єднання залізобетонної полочки зі сталевим тавровим елементом. Зроблено висновки про доцільність таких конструкцій.

**Ключові слова:** сталезалізобетонні конструкції, напружено-деформований стан, несуча здатність, міцність, жорсткість.

**A new construction of steel reinforced concrete flanged beam with reinforced top belt and sequences of its production has been proposed. Four types of connection of reinforced concrete layer with steel T-beam unit have been given. Summary about worth while use of such constructions has been done.**

**Key words:** composite structure, deflected mode, bearing capacity, durability, rigidity.

**Постановка проблеми.** Одним з основних завдань капітального будівництва є скорочення термінів виробництва будівельної продукції та зменшення трудозатрат на її виготовлення. Цього можна досягти, спрощуючи використовувані способи виготовлення та запроваджуючи нові простіші та ефективні методи з меншою трудоемкістю, а також повніше й ефективніше використання будівельних матеріалів, створення нових економічних і довговічних конструкцій.

До таких можна зарахувати сталезалізобетонні конструкції [1, 3–5], які мають високі техніко-економічні показники за рахунок використання переваг кожного з матеріалів, що входять до їх