

УДК 624.074:[624.012.4+624.014.2]

д.т.н., доцент Лапенко О.І.,  
Національний авіаційний університет, м. Київ

## **ВПРОВАДЖЕННЯ ТРУБОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ В ПРАКТИКУ СУЧАСНОГО БУДІВНИЦТВА**

*Показано переваги та недоліки трубобетонних конструкцій. Результати впровадження в практику розрахунків європейських норм проектування.*

Поява трубобетону на рубежі дев'ятнадцятого і двадцятого століть була зумовлена стрімким розвитком чорної металургії та появою залізобетону, який з кожним роком завойовував все впевненіші позиції. І вже перші дослідження над трубобетонними елементами довели, що це дуже перспективна конструкція. Було виявлено, що секрет підвищеної здатності трубобетону полягає в отриманні бетонним ядром унікальних якостей в умовах роботи при об'ємному напружено-деформованому стані.

Ще на початку двадцятого століття було встановлено, що кількість поздовжнього армування ніяк не підвищує міцність бетону. Тільки при побічному армуванні в стиснутих елементах міцність бетону зростає, особливо цей ефект проявляється в трубобетоні. При його використанні досягається висока ефективність роботи металу труби, який створює боковий реактивний тиск на бетонне ядро. Бетон при цьому знаходиться в тривісному напруженому стані, в результаті чого його міцність значно зростає.

Для успішного використання ефективних трубобетонних конструкцій у будівництві з рахуванням їх справжніх властивостей при раціональному сполученні бетону й сталі необхідна надійна теорія їх роботи в умовах об'ємного напружено-деформованого стану складових матеріалів, яка була б основана на глибокому дослідженні фізико-механічних властивостей складових матеріалів і комплексних елементів у цілому. Така теорія розроблена вітчизняними та зарубіжними вченими. Особливістю наведеної в статті теорії об'ємно-напруженого стану трубобетону є те, що вона одночасно враховує нелінійність деформування бетону при короткочасному завантаженні, змінність його фізико-механічних властивостей при тривалій дії навантаження і вид напруженого стану.

При проектуванні сталезалізобетонних конструкцій ставляться завдання позбавитися недоліків сталевих і залізобетонних конструкцій. Треба намагатися, щоб у сталезалізобетонній конструкції бетон працював на стиск, а сталь – на розтяг. Як показує досвід проектування сталезалізобетонних конструкцій, у багатьох випадках цю вимогу вдається задовольнити. І дійсно, незважаючи на прогрес у розвитку, залізобетонні конструкції завжди будуть

залишатися важкими, а сталеві конструкції вирізнятимуться підвищеною металоємністю. А відомо, що вимога щодо економії витрат металу завжди буде актуальною.

В основу нових типів сталезалізобетонних конструкцій покладена концепція синтезу кращих зразків сталевих і залізобетонних конструкцій, котрі враховували б їх суттєві переваги. При цьому використовуються ідеї розділення функцій елементів конструкцій за матеріалами для їх раціональної роботи в споруді.

Тепер сталезалізобетонні конструкції дістали широке розповсюдження в усьому світі. Доведено, що їх раціонально застосовувати у вигляді згинальних конструкцій для перекриття великих прольотів, а також стійок, які сприймають великі навантаження (колони громадських та промислових будівель), в інженерних спорудах. Поперечні перерізи таких конструкцій можуть бути найрізноманітнішими. При використанні сталезалізобетонних конструкцій значно зменшується їх маса, дуже часто можна обійтися без улаштування опалубки й закладних деталей.

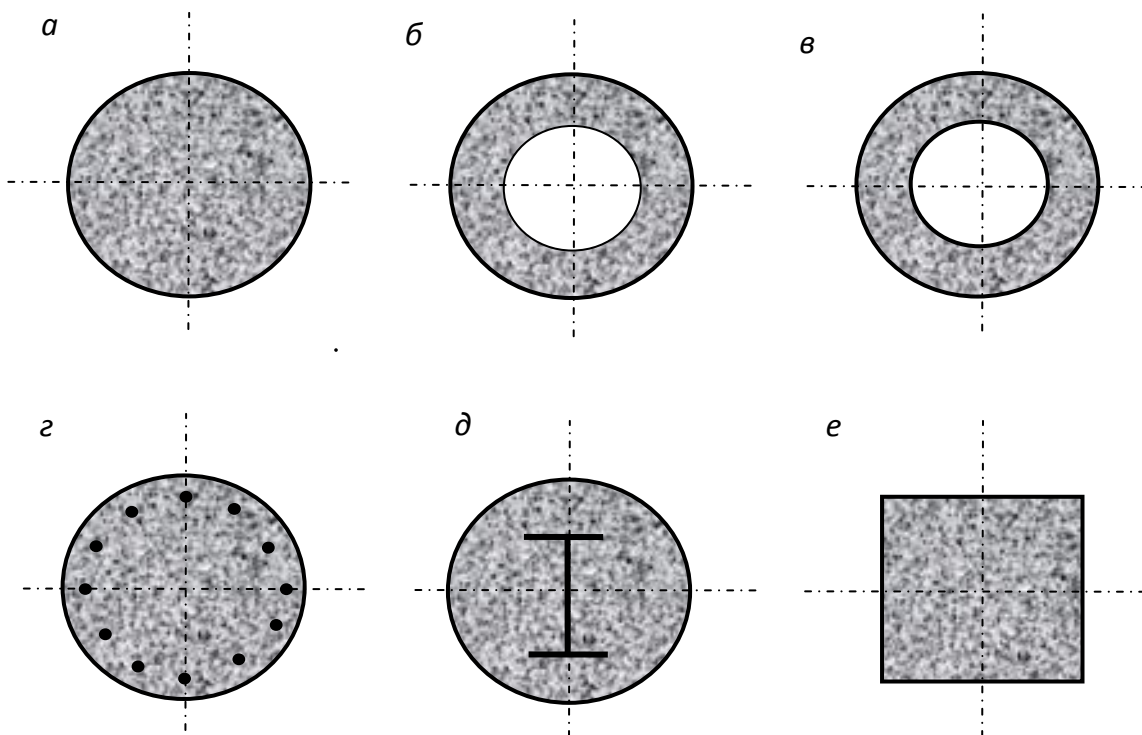


Рисунок 1.1 - Характерні перерізи трубобетонних елементів:

- а* - трубобетонний елемент суцільного перерізу; *б* - елемент «труба в трубі»;
- в* - трубобетонний елемент із ядром із центрифугованого бетону; *г* - елемент із ядром, армованим стрижневою поздовжньою арматурою; *д* - елемент із ядром, армованим прокатним профілем; *е* - елемент у вигляді труби квадратного перерізу, заповненої бетоном.

У нашій країні накопичено значний досвід дослідження та впровадження сталезалізобетонних конструкцій. Побудовано несучі конструкції різних

будівель і споруд із застосуванням трубобетону, балки та ригелі зі стрічковим армуванням, брускові конструкції, залізобетонні плити по профільному настилу. Є багато наукових публікацій у цій галузі [1].

Створення ефективних сталезалізобетонних конструкцій стало можливим завдяки прогресу будівельної механіки, розвитку чисельних методів розрахунку, розширенню можливостей обчислювальної техніки та програмного забезпечення, розрахунку складних комбінованих конструкцій з урахуванням дійсних властивостей матеріалів при їх сумісній роботі. Все це дозволило розробити методи розрахунків, що враховують реальні умови роботи сталезалізобетонних конструкцій.

У сучасному будівництві Німеччини сталезалізобетонні й трубобетонні конструкції, які об'єднуються одним загальним терміном “сталобетонні конструкції” (Verbundstützen), здобули широке розповсюдження. Елементи сталобетонних конструкцій виконуються із зовнішнім або внутрішнім армуванням прокатними профілями, мають прямокутну чи круглу форму поперечного перерізу та обов'язково з бетонним заповненням. Вони можуть бути додатково армовані стрижневою арматурою (рисунок 1.2).

У ФРН розрахунок сталобетонних конструкцій виконується за нормами “E DIN 18800-5 Verbundbau”, які є розвиненням європейських норм Eurocode 4 і розповсюджуються на проектування сталобетонних елементів будь-якого типу і форми поперечного перерізу, завантажених поздовжніми силами та згинаючими моментами. Розрахунок стиснутих сталобетонних елементів виконується за граничними станами [3].

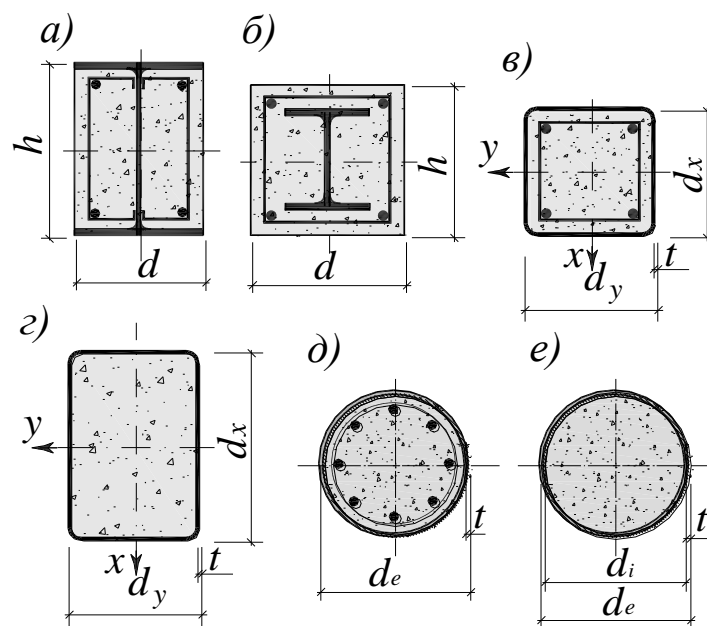


Рисунок 1.2 - Основні типи поперечних перерізів сталобетонних елементів.

Розглядаються такі види розрахунків:

1. За несучою спроможністю. При цьому залежно від конструктивних факторів, що зважаються при проектуванні, розрахунок провадиться:

а) з урахуванням початкових недосконалостей, за так званою теорією 2-го порядку. Такий розрахунок виконується у випадку, якщо частка зусиль від дії згинаючого момента  $M$  у поперечному перерізі перевищує 10 %;

б) з урахуванням усадки і повзучості бетону, коли зусилля від згинаючого момента  $M$  становлять більше ніж 10 % від загальних зусиль усього навантаження;

в) за критичними напругами з урахуванням поздовжнього згину.

2. На міцність стиків.

3. На взаємодію під навантаженням по поверхні контакту між сталевим профілем (трубою) і бетонним заповнювачем.

4. На міцність елемента по зсувному зусиллю від дії граничної поперечної сили.

Положення норм Е DIN 18800-5 розповсюджуються на всі види сталобетонних конструкцій. Для чіткого і якісного визначення елементів, які належать до сталобетонних, встановлена область сталобетонних конструкцій. Для цього впроваджено спеціальний параметр поперечного перерізу, так званий коефіцієнт ефективності поперечного перерізу  $\delta$ . Цей коефіцієнт описує відношення несучої спроможності окремо взятого сталевого профілю (труби), як самостійного елемента (без участі бетону), до несучої здатності сталобетонного елемента. Коефіцієнт ефективності поперечного перерізу є показовою характеристикою й визначається за формулою

$$\delta = \frac{R_s A_{sp}}{N_{pb}}, \quad (1.1)$$

де  $R_s$  - розрахунковий опір сталевого профілю;

$A_{sp}$  - площа поперечного перерізу сталевого профілю;

$N_{pb}$  - міцність сталобетонного елемента без урахування гнучкості.

Отже, елементи, що працюють на стиск, розраховуються як сталобетонні, якщо дотримується умова

$$0,2 \leq \delta \leq 0,9. \quad (1.2)$$

При  $\delta > 0,9$  стиснутий елемент розраховується як елемент металеві конструкції, а при  $\delta < 0,2$  – як елемент залізобетонної конструкції.

При проектуванні сталобетонних конструкцій додержуються встановлені нормами граничні співвідношення розмірів поперечного перерізу елементів до товщини полиці (стінки) сталевого прокатного профілю. Так, для сталобетонних елементів (перерізи типу *a*, рисунок 1.2) норми рекомендують приймати  $d/t_f \leq 44\sqrt{240/R_s}$ , де  $t_f$  – товщина полиці двотавра, для прямокутних (перерізів типу *z* рисунок 1.2) –  $d_x/t \leq 52\sqrt{240/R_s}$ , а для трубобетонних перерізів (перерізи типу *e*, рисунок 1.2) –  $d_e/t \leq 90\sqrt{240/R_s}$ .

Відповідно до норм, що розглядаються, розрахунок сталобетонних елементів виконується двома способами: точним та наближеним. Точний метод розрахунку (розрахунок за теорією 2-го порядку) виконується за деформованою схемою, яка враховує можливі початкові геометричні й структурні недосконалості конструкції, місцеву нестійкість та утворення тріщин, а також усі особливості, котрі виникають під час виготовлення, транспортування, монтажу і т. ін. Зростання міцності бетону при цьому можна не враховувати, але обов'язково враховується вплив тріщин на жорсткість конструкції. Такі розрахунки виконуються за спеціальними програмами для ПК. При цьому в нормах наведена спеціальна таблиця, в якій регламентується весь хід розрахунку.

Спрощений метод розрахунку розповсюджується на елементи із симетричною формою поперечного перерізу. При розрахунку за спрощеним методом відношення сторін повинно задовольняти умову  $0,2 \leq h/b \leq 5,0$ .

За наявності в сталобетонному елементі поздовжньої арматури її максимальна площа поперечного перерізу приймається у розмірі 6 % від площі поперечного перерізу бетону. Величина граничних значень напруг у бетоні сталобетонного елемента приймається  $\alpha R_b$ , де  $\alpha$  – відношення міцності бетону при завантаженні  $R_{b,shl}$  до міцності бетону з урахуванням тривалих процесів  $R_{bl}$ .

Вплив поперечних сил враховується у випадку, коли величина поперечного зусилля, яка сприймається прокатним профілем (трубою), становить більше від половини значення розрахункового опору металу. В цьому випадкові поперечне зусилля розподіляється між сталевим профілем і бетоном пропорційно моментам опору їх поперечних перерізів.

При розрахунках сталобетонних елементів з урахуванням поздовжнього згину величина жорсткості елемента приймається залежно від способу розрахунку. В обох випадках жорсткість сталобетонного елемента являє собою суму жорсткостей окремих його складових: сталевий профілю, бетону й арматури.

Жорсткість сталобетонного елемента у звичайного способу розрахунку визначається формулою

$$(EI)_{wk} = E_p I_p + 0,6E_b I_b + E_s I_s . \quad (1.3)$$

Жорсткість сталобетонного елемента при розрахунку за деформованою схемою (за теорією 2-го порядку) дорівнює

$$(EI)_{wd} = 0,9(E_p I_p + 0,5E_b I_b + E_s I_s). \quad (1.4)$$

В останніх двох формулах (1.3) і (1.4):  $E_p I_p$ ,  $E_b I_b$  та  $E_s I_s$  – відповідно жорсткості сталевих профілю (труби-оболонки), бетону та арматури. Модуль пружності бетону  $E_b$  визначається згідно з нормами DIN 1045-1. Утворення тріщин у бетонному заповнювачі сталобетонного елемента при розрахунку за теорією 2-го порядку враховується коефіцієнтом 0,5.

Вплив тривалих процесів (усадки та повзучості бетону) на несучу здатність сталобетонних елементів ураховується тільки в елементах з незначним ексцентриситетом прикладення зовнішнього навантаження ( $e/d < 2$ ) та у випадку, якщо їх гнучкість не перевищує гранично встановленого значення  $\lambda_r$ . Граничне значення гнучкості приймається:

– для елементів, поперечний переріз яких складається з прокатних профілів або являє собою переріз із зовнішнім армуванням  $\lambda_r = 0,8$  при незмінній конструктивній схемі та  $\lambda_r = 0,5$  при змінній конструктивній схемі;

– для трубобетонних елементів  $\lambda_r = 0,8/(1 - \delta)$  і відповідно  $\lambda_r = 0,5/(1 - \delta)$ .

Вплив тривалих процесів (усадки і повзучості бетону) можна враховувати більш спрощено, тобто зниженням величини обчисленого модуля пружності бетону. В цьому випадку вважається, що частина напруг перерозподіляється на сталевий профіль. Модуль пружності бетону з урахуванням усадки й повзучості бетону в цьому випадку визначається за виразом

$$E_{bt} = E_b [1 - 0,5(N_g/N_{tot})], \quad (1.5)$$

де  $N_{tot}$  – поздовжнє зусилля від усього навантаження;

$N_g$  – постійна частина навантаження.

У випадку постійної дії тривалого навантаження модуль пружності бетону  $E_b$  скорочується вдвічі.

Для практичних інженерних розрахунків сталобетонних елементів на осьовий стиск при тривалій дії навантаження німецькі норми, що розглядаються, рекомендують спрощений спосіб визначення розмірів поперечного перерізу, за якого розрахунок виконується ручним способом. Цей спосіб ураховує також вплив усадки і повзучості бетону та добре поєднується з європейськими критеріями визначення критичних станів. Спрощений спосіб

розповсюджується на розрахунок центрально стиснутих сталобетонних елементів, у яких поперечний переріз подвійної симетричної форми і є незмінним за висотою елемента. При цьому особливо підкреслюється недопустимість недотримання указаних конструктивних вимог. Крім того, спрощений спосіб припускає наявність достатньої товщини захисного шару бетону.

Положення норм поширюється на елементи з малою відносною гнучкістю ( $\bar{\lambda} \leq 0,2$ ) або з незначним відносним поздовжнім зусиллям ( $N_{tot}/N_l \leq 0,1$ ).

Тут  $\bar{\lambda}$  – відносна зведена гнучкість елемента;

$N_{tot}$  – сумарне поздовжнє зусилля від усього навантаження;

$N_l$  – зусилля від тривалої дії частки навантаження.

Відносна зведена гнучкість сталобетонних елементів визначається за формулою

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pb,l}}{N_{cr}}}, \quad (1.6)$$

де  $N_{pb,l}$  – несуча здатність сталобетонного елемента з урахуванням тривалих процесів;

$N_{cr}$  – умовна критична сила за Ейлером, яка дорівнює

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_{wk}}{l^2}, \quad (1.7)$$

де  $(EI)_{wk}$  – фактична жорсткість елемента з урахуванням початкових недосконалостей;

$l$  – довжина елемента.

Отже, несуча здатність сталобетонних елементів при осьовому стиску з урахуванням тривалих процесів  $N_{pb,l}$  згідно з німецькими нормами визначається за формулою

$$N_{pb,l} = R_{sp} A_p + \alpha_l R_b A_b + R_s A_s, \quad (1.8)$$

де  $R_{sp}$ ,  $R_b$  та  $R_s$  – відповідно розрахункові опори сталевого профілю, бетону та арматури;

$A_p$ ,  $A_b$  та  $A_s$  – площі поперечного перерізу сталевого профілю, бетону та арматури відповідно;

$\alpha$  – коефіцієнт, який ураховує тривалі процеси, приймається таким, що дорівнює 0,85.

Розрахунок сталобетонних елементів з урахуванням поздовжнього згину (при  $\bar{\lambda} \leq 0,2$ ) виконується відповідно до норм DIN 18800-2, які також погоджуються із європейським підходом до визначення критичних напруг  $\epsilon$  в граничному стані. Розрахунок за міцністю з урахуванням поздовжнього згину виконується у разі, коли для обох головних осей поперечного перерізу дотримується умова

$$\frac{N_{tot}}{\chi N_{pb}} \leq 1,0, \quad (1.9)$$

де  $\chi$  – відносна несуча спроможність сталобетонного елемента, відношення несучої спроможності з урахуванням гнучкості  $N_{Rd}$  до розрахункової несучої спроможності без урахування гнучкості  $N_{pl,Rd}$ ,  $\chi = N_{Rd}/N_{pl,Rd}$ .

Незважаючи на відсутність в Україні нормативних документів щодо проектування трубобетонних конструкцій, відомо дуже багато випадків застосування цих конструкцій у будівництві. Безумовно, той факт, що трубобетонні конструкції можуть успішно конкурувати з металевими і залізобетонними конструкціями з суттєвим економічним ефектом, дає їм право на широке застосування.

При проектуванні трубобетонних конструкцій особлива увага приділяється використанню з максимальним ефектом природних переваг цих конструкцій, що стає можливим при варіантному проектуванні з використанням методів оптимізації. Використовуючи надзвичайну властивість таких конструкцій, найбільша ефективність досягається при використанні в несучих елементах компоновки поперечних перерізів, які характерні для трубобетонних конструкцій.

### Використана література

1. Стороженко Л.І., Сурдін В.М., Єфіменко В.І., Вербицький В.І. Сталезалізобетонні конструкції. Дослідження, проектування, будівництво, експлуатація. – Кривий Ріг: КТУ, 2007. – 448 с.
2. Стороженко Л.И., Пахотный П.И., Черный А.Я. Расчёт трубобетонных конструкций. – К.: Будівельник, 1991. – 120 с.
3. Eurocode 4. Common Unified Rules for Composite Steel and concrete Structures European Committee for Standardization. (CEN) ENV. 1994 – 1-1: 1992.

### Анотація

Показано переваги та недоліки трубобетонних конструкцій. Результати впровадження в практику розрахунків європейських норм проектування.

### Abstract

Advantages and lacks of trubobetonnikh constructions are rotined. Results of introduction are in practice of calculations of the European norms of planning.