

УДК 624.012

д.т.н., професор Єфіменко В.І., Паливода О.А.,
ДВНЗ "Криворізький національний університет"

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТИСНУТИХ ТРУБОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗІ ЗМІЦНЕНИМИ ОСЕРДЯМИ КІЛЬЦЕВОГО ПЕРЕРІЗУ

Розглянуто проблеми, що обмежують застосування трубобетонних конструкцій підвищеної міцності. Виконано аналіз особливостей розвитку деформацій та характеру руйнування стиснутих трубобетонних елементів зі зміцненими осердями кільцевого перерізу при осьовому стиску в залежності від геометричних параметрів та конфігурації поперечного перерізу.

Ключові слова: *трубобетон; деформації; кільцевий переріз; осердя.*

Вступ. Однією з важливих задач, які виникають в сучасному будівництві, є пошук оптимальних рішень щодо застосування стиснутих елементів з високою несучою здатністю. Безперечно у вирішенні цього питання на перший план виходять сталезалізобетонні конструкції, зокрема трубобетонні. Проте, зважаючи на значні витрати сталі, що суттєво здорожує будівництво, звичайний трубобетон не завжди конкурентний за техніко-економічними показниками порівняно з іншими конструкціями. Тому оптимальні пропозиції щодо збільшення несучої здатності осердя дадуть можливість підвищити показники ефективності (в тому числі й економічної) трубобетонних елементів.

Таким чином, вивчення особливостей розвитку деформацій та характеру руйнування стиснутих трубобетонних елементів зі зміцненими осердями, які мають кільцевий переріз, є актуальним напрямком та дозволить наблизитись до вирішення задач, що розглядаються.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Зважаючи на ґрунтовність досліджень багатьох вчених щодо роботи звичайного трубобетону та все більш жорсткі вимоги щодо економії, все більше уваги концентрується на вивченні ефективних трубобетонних конструкцій підвищеної міцності. До таких належать і ті, що мають кільцевий переріз.

Одними з перших досліджень з вивчення трубобетонних елементів кільцевого перерізу відзначають роботи В.П. Ефімова [1].

У подальшому ґрунтовне вивчення наскрізних трубобетонних елементів було проведено в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка В.М. Спільчуком [2]. Пізніше деякі дослідження даних елементів знаходили своє продовження у роботах представників полтавської та криворізької шкіл трубобетону [3,4].

З останніх робіт слід виділити дослідження трубобетону із кільцевими центрифугованими ядрами, що проведені в КНУ під керівництвом В.І. Єфіменка [5-7]. Виконані роботи показали, що в цьому випадку бетонне ядро працює дуже ефективно, а такі конструкції доцільно використовувати як при стиску з різними ексцентриситетами, так і при роботі на згин.

Важливі дослідження даних елементів відображені у роботах А.Л. Крішана [8,9], в яких ущільнення осердя досягається пневматичним методом, при цьому в ядрі утворюється вертикальна порожнина.

Постановка завдання. Метою проведення експериментальних випробувань є дослідження закономірностей характеру розвитку об'ємного напруженого стану, особливостей деформування та характеру руйнування трубобетонних елементів зі зміцненим осердям кільцевого перерізу при осьовому стиску в залежності від геометричних параметрів та конфігурації поперечного перерізу.

Основний матеріал і результати. Для отримання експериментальних результатів, які дадуть можливість в достатній мірі судити про особливості роботи даних елементів при осьовому стиску в залежності від способу зміцнення осердя, необхідно запроєктувати та виготовити наступні групи зразків:

Група Іа. Із центрифугованим осердям з внутрішньою порожниною.

Група Іб. Із центрифугованим осердям та внутрішньою порожниною, заповненою бетоном;

Група Іа. Двотрубчасті з внутрішньою порожниною;

Група Іб. Двотрубчасті з внутрішньою порожниною, заповненою бетоном.

При складанні програми експериментальних випробувань враховано, що несуча здатність трубобетонних елементів залежить від геометричних розмірів складових комплексної конструкції (геометричних характеристик сталевих труб та бетонного елемента) і фізико-механічних властивостей матеріалів – сталі й бетону.

Одночасно з відповідними основними зразками планувалося виготовлення зразків із порожніх труб для експериментального визначення коефіцієнту ефективності трубобетону. Ці зразки мали маркування, наприклад Т-Па-1 – труби для зразків першого діаметру другої групи. Механічні характеристики металу визначалися шляхом випробування порожніх труб на стиск і випробування на розтяг вирізаних зі стінок труб стандартних зразків-смужок.

Разом з відповідними основними зразками планувалося виготовлення трьох комплектів стандартних бетонних кубиків (150×150×150 мм) і призм

(150×150×600 мм) для визначення фізико-механічних властивостей бетону. Призми мали маркування, наприклад Б-*I*-1 – бетон першого складу для зразків першої групи.

Розглянемо особливості розвитку деформацій дослідних зразків під навантаженням роздільно для кожної з груп. Їхні геометричні розміри та проектні значення фізико-механічних характеристик сталі та бетону наведені в табл. 1.

Зразки мають позначення, наприклад ТБ-*IIa*-1, яке вказує на характеристику прийнятих труб та бетону.

Таблиця 1.

Характеристика дослідних зразків груп *I* та *II*

Група зразків	Серія зразків	Характеристика зовнішньої труби $D \times t$, мм	Характеристика внутрішньої труби $D_e \times t_e$, мм	Міцність бетону кільця $f_{ck,prism1}$, МПа	Міцність бетону заповнення $f_{ck,prism1}$, МПа
<i>I</i>	Т- <i>I</i> -1	325,0×8,0	–	–	–
	ТБ- <i>Ia</i> -1	325,0×8,0	–	38,9	–
	ТБ- <i>Iб</i> -1	325,0×8,0	–	38,9	28,8
<i>II</i>	Т- <i>II</i> -1 [/]	169,0×	–	–	–
	Т- <i>II</i> -2 ^{//}	–	89,0×2,8	–	–
	ТБ- <i>IIa</i> -1	169,0×6,0	89,0×2,8	21,0	–
	ТБ- <i>IIб</i> -1	169,0×6,0	89,0×2,8	21,0	18,8

При плануванні експерименту були прийняті певні обмеження. Довжина трубобетонних елементів визначалась за формулою $L = 4D$.

Всі зразки випробовувалися після 28 діб витримування, необхідного для набрання міцності бетону. Завантажувалися через шарніри по фізичній вісі. Ступені завантаження складали в основному 0,1 від руйнуючої сили на початку випробування і 0,05 – при досягненні граничного стану за несучою здатністю.

Поздовжні деформації при випробуванні зразків вимірювалися за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм та електротензорезисторів.

Для кріплення індикаторів і прогиномірів до дослідних зразків до металевої поверхні труби приварювали гайки. Електротензорезистори наклеювалися за допомогою клею БФ-2. Для зняття показників використовувався прилад АИД-2М.

Для зразків групи *I* в якості труби-оболонки прийняти цільнотягнуті труби із зовнішнім діаметром $D = 325$ мм при товщині стінки труби $t = 8$ мм. У

результаті випробувань встановлено, що для сталі труби межа плинності $R_y = 253$ МПа, тимчасовий опір $R_u = 270$ МПа, модуль пружності $E_s = 2,08 \times 10^5$ МПа.

У цьому випадку використані два склади бетонів. Бетон складу 1 застосовувався для утворення центрифугованого кільця, а бетон складу 2 – для заповнення порожнини, що при цьому утворювалася. Фізико-механічні характеристики бетону для зразків групи **I** наведені у табл. 2.

Таблиця 2.

Фізико-механічні характеристики випробуваного бетону для зразків групи **I**

Склад бетону	Кубикова міцність, МПа	Призмova міцність $f_{ck,prism}$, МПа	Модуль деформацій $E_b \times 10^{-4}$ МПа	Коефіцієнт Пуассона ν
1	39,6	28,8	2,40	0,18
2	27,6	21,0	2,00	0,17

Для зразків групи **II** в якості зовнішньої труби-оболонки прийняті цілнотягнуті труби із зовнішнім діаметром $D = 169$ мм при товщині стінки труби $t = 6$ мм. У результаті випробувань встановлено, що для сталі труби 1 межа плинності $R_y = 253$ МПа, тимчасовий опір $R_u = 270$ МПа, модуль пружності $E_s = 2,08 \times 10^5$ МПа. В якості внутрішньої труби-вставки прийняті цілнотягнуті труби із зовнішнім діаметром $D_2 = 89$ мм при товщині стінки труби $t_2 = 2,8$ мм. У результаті випробувань встановлено, що для сталі труби 2 межа плинності $R_y = 251$ МПа, тимчасовий опір $R_u = 281$ МПа, модуль пружності $E_s = 2,06 \times 10^5$ МПа.

У цьому випадку використані два склади бетонів. При цьому бетон складу 1 застосовувався для утворення кільця між зовнішньою та внутрішньою трубами, а бетон складу 2 – для заповнення порожнини внутрішньої труби.

Бетон складу 1 мав такі фізико-механічні властивості: кубикова міцність – 29 МПа, призмova міцність $f_{ck,prism} = 20$ МПа. Бетон складу 2 у цьому випадку за своїми характеристиками відповідав бетону, що використовувався при виготовленні зразків Б-Пб-2 (склад 2 в табл. 2.).

Таким чином, під час експерименту вимірювалися поздовжні й поперечні деформації зразків при осьовому завантаженні, за результатами яких визначався їх напружений стан.

На рис. 1. наведена залежність поздовжніх і поперечних деформацій від навантаження $N-\epsilon$ для труботонних зразків серій ТБ-Іа-1, ТБ-Іб-1. Із аналізу графіків видно, що залежність носить криволінійний характер. Заповнення порожнини віброваним бетоном впливає на величину деформацій та характер їх розвитку. Відносні граничні поздовжні деформації мають великі значення та досягають 300×10^{-5} і більше.

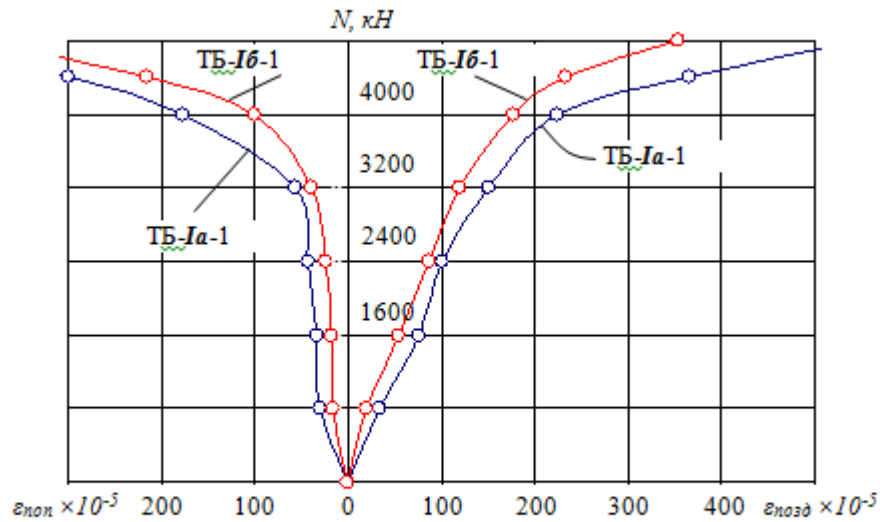


Рис. 1. Залежність деформацій ε від навантаження N в зразках серій ТБ-Ia-1, ТБ-Iб-1

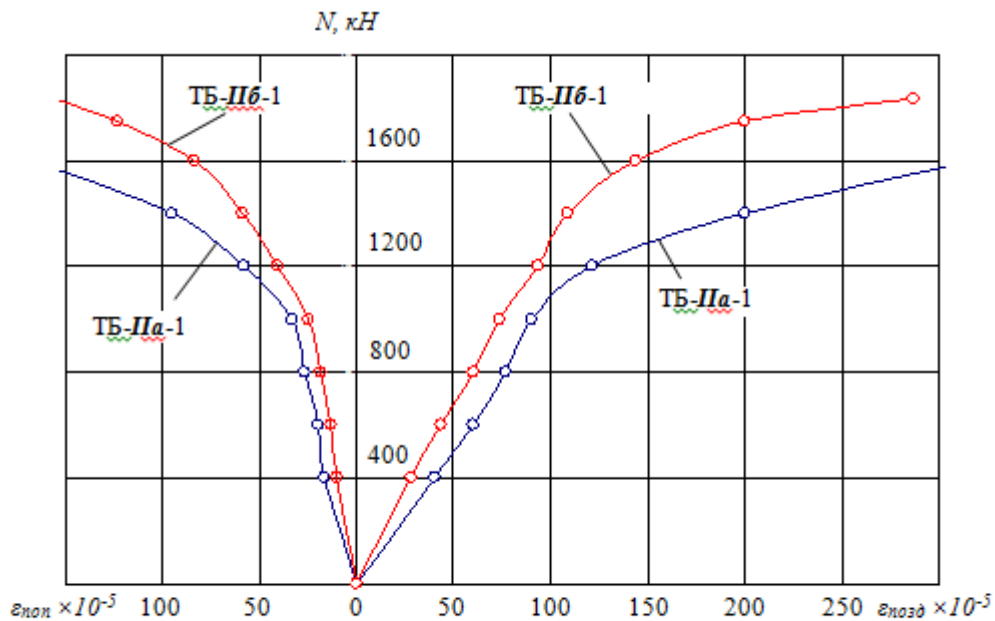


Рис. 2. Залежність деформацій ε від навантаження N в зразках серій ТБ-IIa-1, ТБ-IIб-1

На рис. 2. наведена залежність поздовжніх і поперечних деформацій від навантаження N - ε для трубобетонних зразків серій ТБ-IIa-1, ТБ-IIб-1. Із аналізу графіків видно, що залежність носить криволінійний характер. Зміцнення ядра внутрішньою трубою має вплив на величину деформацій та характер їх розвитку. Як і в попередньому випадку, відносні граничні поздовжні деформації мають великі значення та досягають 300×10^{-5} і більше.

Висновки. При зведенні трубобетонних конструкцій витрати сталі значно більші, ніж при виготовленні залізобетонних. Економії сталі можна досягти, влаштовуючи зміцнені осердя. Проте залишаються практично не дослідженими особливості роботи трубобетонних елементів з деякими способами зміцнення осердя. Відсутні рекомендації щодо їх розрахунку.

Заповнення бетоном поздовжньої порожнини як елементів з центрифугованим осердям, так і елементів з внутрішньої трубою впливає на розвиток поперечних деформацій, оскільки коефіцієнти поперечної деформації в граничному стані зразків із заповненими порожнинами в обох випадках приблизно на 10% менші, ніж в наскрізних елементах.

Таким чином, заповнення віброваним бетоном порожнин зразків обох груп впливає на об'ємний стан бетонного ядра. Це дає привід для аналізу несучої здатності досліджуваних елементів.

Список використаних джерел

1. Ефимов В.П. Прочность и устойчивость комбинированных сквозных элементов из стальных труб, заполненных высокопрочным бетоном: автореф. дис. канд. техн. наук / В.П. Ефимов. – Таллин, 1989. – 23 с.
2. Спильчук В.М. Оптимизация параметров трубобетонных элементов кольцевого сечения: дис. ... канд. техн. наук / В.М. Спильчук. – Полтава, 1996. – 158 с.
3. Стороженко Л.І. Сталезалізобетонні конструкції. Дослідження, проектування, будівництво, експлуатація / Л.І. Стороженко, В.М. Сурдін, В.І. Єфіменко, В.І. Вербицький. – Кривий Ріг: КТУ, 2007. – 448 с.
4. Стороженко Л.И. Строительные конструкции из стальных труб, заполненных центрифугированным бетоном / Л.И. Стороженко, В.И. Ефименко, В.Ф. Пенц. – К.: "Четверта хвиля", 2001. – 158 с.
5. Ефименко В.И. Центрифугированные трубобетонные конструкции / В.И. Ефименко. – Кривой Рог: КТУ, 2008. – 257 с.
6. Ефименко В.И. Напряженно-деформированное состояние в упругой стадии работы центрифугированных трубобетонных элементов при осевом сжатии / В.И.Ефименко, А.П.Сухан // Зб. „Будівельні конструкції”. К.: НДІБК. – Вип. 70, 2008. – С. 96 – 102.
7. Єфіменко В.І. Несучі конструкції зі сталевих труб, заповнених центрифугованим бетоном: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.І. Єфіменко. – Дніпропетровськ, 2009. – 38 с.
8. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны с ядром из бетона на расширяющемся цементе / А.Л. Кришан, М.Н. Кошелев, К.С. Кузнецов, А.С. Мельничук // Мат-лы 66-й науч.-техн. конф.: Сб. докл. – Т.2. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – С. 6 – 7.
9. Кришан А.Л. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром: автореф. дисс. ... докт. техн. наук: спец. 05.23.01 "Строительные конструкции. Здания и сооружения" / А.Л.Кришан. – Ростов-на-Дону, 2011. – 32 с.

АННОТАЦИЯ

Рассмотрено проблемы, которые ограничивают применение трубобетонных конструкций повышенной прочности. Выполнено анализ особенностей развития деформаций и характера разрушения сжатых трубобетонных элементов с упрочненными ядрами кольцевого сечения при осевом сжатии в зависимости от геометрических параметров и конфигурации поперечного сечения.

Ключевые слова: трубобетон; деформации; сердечник; кольцевое сечение.

ANNOTATION

The problems that limit the use of tube confined concrete are studied. The analysis of features of deformation development and fracture of compressed tube confined concrete elements of solid section with reinforced cores under axial compression, depending on the cross-sectional dimensions, wall thickness and strength of the concrete core is carried out.

Key words: tube confined concrete, deformations, reinforced core, circular section.