

В.І. ЄФІМЕНКО, д-р техн. наук, проф., О.А. ПАЛИВОДА, асистент,
О.П. СУХАН, ст. викладач, Криворізький національний університет

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТИСНУТИХ ТРУБОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗІ ЗМІЦНЕНИМИ ОСЕРДЯМИ СУЦІЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ

Розглянуто проблеми, що обмежують застосування трубобетону. Виконано аналіз особливостей розвитку деформацій та характер руйнування стиснутих трубобетонних елементів суцільного перерізу зі зміцненими осердями при осьовому стиску в залежності від розмірів поперечного перерізу, товщини стінки труби та міцності бетонного ядра.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В умовах сьогодення перед будівельниками часто постає необхідність у застосуванні стиснутих елементів, які б мали високий ступінь несучої здатності. Такі вимоги цілком задовольнить трубобетон. Завдяки своїм чисельним перевагам, трубобетонні конструкції отримали широке розповсюдження. Проте значні витрати сталі, як головний недолік трубобетону, гальмують його застосування.

Відомо, що в стиснутих трубобетонних елементах діюче зусилля сприймається як трубою оболонкою, так і бетонним осердям. Якщо збільшити несучу здатність осердя, то можна зменшити витрати сталі для отримання трубобетонного елемента з наперед заданою несучою здатністю. Тому використання зміцненого осердя приведе до значного зменшення витрат сталі й економії коштів при зведенні конструкції. Таким чином, дослідження стиснутих трубобетонних елементів суцільного перерізу зі зміцненим осердям, зокрема вивчення розвитку їх деформацій, дасть змогу обрати найбільш ефективні конструктивні рішення таких конструкцій.

Аналіз досліджень і публікацій. Перші в колишньому СРСР дослідження міцності трубобетону провів Г.П. Передерій у 1932 р. [1]. До подальшого вивчення та випробування трубобетонних конструкцій значних зусиль доклали такі вчені, як О.О. Гвоздев, В.А. Росновський, О.А. Долженко, Р.С. Санжаровський.

Починаючи з 1964 р. в КГРІ [2-5], а згодом в ПолтНТУ [6-7], під керівництвом Л.І. Стороженка проводиться широке дослідження трубобетону. Виконані експериментальні дослідження підтвердили ефективність трубобетонних конструкцій та дозволили встановити закономірності їх роботи.

В.М. Сурдіним [7,8] у Кривому Розі проведено експериментально-теоретичні дослідження трубобетону при короткочасній та тривалій дії навантаження.

Окрім того, над дослідженнями трубобетонних конструкцій, зокрема тих, що мають суцільний переріз, успішно працювали і продовжують це робити багато вчених, що представляють різні наукові школи.

Із робіт останніх років у контексті питань запропонованої тематики доречно відзначити ґрунтовні дослідження, виконані Д.А. Єрмоленком в ПолтНТУ [10-12]. Вони присвячені розробленню методики оцінювання напружено-деформованого стану та розрахунку несучої здатності трубобетонних елементів із урахуванням дійсних їх фізико-механічних властивостей, геометричних параметрів та способу завантаження на основі моделі складеного тіла. При цьому, значну увагу приділено аналізу існуючих теорій міцності й методів оцінювання напружено-деформованого стану трубобетонних конструкцій з урахуванням об'ємної роботи осердя та оболонки, а також теоретичному моделюванню роботи трубобетону під навантаженням.

Ці та інші роботи дають достатньо повне уявлення про особливості роботи під навантаженням трубобетонних елементів із осердями звичайної міцності. Однак до теперішнього часу існує ще дуже багато питань, пов'язаних з будівництвом сталезалізобетонних конструкцій, які залишаються не дослідженими. Зокрема такі, що стосуються трубобетонних елементів із осердями підвищеної міцності.

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 суцільного перерізу

при осьовому стиску в залежності від розмірів поперечного перерізу, товщини стінки труби та міцності бетонного ядра.

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 зразки: з осердями з високоміцного бетону та з осердями, зміцненими поздовжньою стрижневою арматурою.

Викладення матеріалу та результати. 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 [5, 13].

Для отримання експериментальних результатів, які дадуть можливість в достатній мірі судити про особливості розвитку деформацій трубобетонних елементів при осьовому стиску в залежності від способу зміцнення осердя, були запроєктовані та виготовлені такі групи зразків:

група I - зразки з осердями з високоміцного бетону;

група II - зразки з осердями, зміцненими поздовжньою стрижневою арматурою.

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

Таблиця 1

Характеристика дослідних зразків груп I та II

Група зразків	Серія зразків	Зовнішній діаметр труби, D , мм	Товщина стінки труби, t , мм	Міцність бетону $f_{ck, prism}$, МПа
I	T-I-1	110,6	2,75	=
	T-I-2	163,0	5,50	-
	T-I-3	204,4	5,20	-
	ТБ-I-11	110,6	2,75	50,0
	ТБ-I-12	110,6	2,75	64,2
	ТБ-I-13	110,6	2,75	80,0
	ТБ-I-21	163,0	5,50	50,0
	ТБ-I-22	163,0	5,50	64,2
	ТБ-I-23	163,0	5,50	80,0
	ТБ-I-31	204,4	5,20	50,0
	ТБ-I-32	204,4	5,20	54,2
	ТБ-I-33	204,4	5,20	80,0
	II	T-II-1	159,0	4,00
ТБ-II-11		159,0	4,00	13,9
ТБ-II-12		159,0	4,00	24,3
ТБ-II-13		159,0	4,00	29,1

Примітка. Трубобетонні зразки групи II армовані поздовжньою стрижневою арматурою 6d12A-III.

Зразки *групи I* мають позначення, наприклад ТБ-I-11, де останні цифри позначають характеристику прийнятих труби та бетону. Як видно з табл. 1, діаметр труб в зразках цієї групи коливався в межах 100-200 мм, міцність бетону - в межах 50-80 МПа.

Зразки *групи II* мають позначення, наприклад ТБ-II-11, де останні цифри позначають характеристику прийнятих труби та бетону. Діаметр труб в зразках цієї групи складав 159 мм, а проектна міцність бетону коливалась в межах 15-30 МПа.

Одночасно з відповідними основними зразками планувалося виготовлення зразків із порожніх труб для експериментального визначення коефіцієнту ефективності трубобетону. Ці зразки мали маркування, наприклад T-I-1 - труби першого діаметру для зразків першої групи. Для визначення фізико-механічних властивостей сталі вирізалися спеціальні смужки.

Разом із відповідними основними зразками планувалося виготовлення 3-х 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.

При плануванні експерименту були прийняті певні обмеження. Довжина трубобетонних елементів визначалась за формулою $L=4D$. Така довжина зразків дозволяє дослідити їх роботу на міцність без впливу поздовжнього вигину та інших особливостей, що пов'язані з роботою

конструкцій на стійкість. Кожна серія включала в себе однакові зразки-близнюки. Навантаження розподілялось на комплексний переріз. При передачі навантаження на комплексний переріз оболонка та ядро завантажувались одночасно, при цьому на верхньому торці зразка оболонка та ядро отримували однакові вертикальні переміщення. У результаті схема завантаження зразків наближалась до центрального стиснення. Усі зразки із порожніх і заповнених бетоном труб були пофарбовані за два рази кузбаслаком для можливості спостереження в процесі випробування за появою ліній Людерса-Чернова.

Усі зразки випробовувалися після 28 діб витримування, необхідного для набрання міцності бетону. Випробування зразків проводилось в пресі ПММ-250. Зразки, що випробовувалися на центральний стиск (порожні та заповнені бетоном труби, бетонні призми), завантажувалися через шарніри по фізичній вісі, положення якої устанавлювалося методом пробних завантажень. 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. Поздовжні й поперечні деформації в стиснутих елементах вимірювалися також за допомогою електрорезисторів. Електротензорезистори наклеювалися за допомогою клею БФ-2. Для зняття показників використовувався прилад АИД-2М. Кожен електротензорезистор був під'єднаний до вимірювального приладу АИД-1, за допомогою якого відбувалась фіксація деформацій.

Механічні характеристики металу визначалися шляхом випробування порожніх труб на стиск і випробування на розтяг вирізаних зі стінок труб стандартних зразків-смужок. Дані випробувань для зразків групи I наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Фізико-механічні характеристики сталі труб для зразків групи I

Серія зразків	Діаметр і товщина стінки труби $D \times t$, мм	Напруження при стиску		Напруження при розтягу R_p , Мпа
		R_y , МПа	R_u , Мпа	
T-I-1	110,6×1,9	308	445	540
T-I-2	163,0×5,5	317	475	562
T-I-3	204,4×5,2	336	413	523

Під час випробування бетонних призм вимірювалися поздовжні й поперечні деформації за допомогою електротензорезисторів, а, крім того, поздовжні деформації вимірювалися індикаторами годинникового типу. В результаті випробування призм були побудовані графіки залежності деформацій від напруження σ - ϵ , була визначена призмova міцність і вираховані модуль деформацій та коефіцієнт поперечної деформації бетону. Кубикова міцність бетону визначалась у результаті випробування кубів з розміром ребра 150 мм. Фізико-механічні властивості бетону наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Фізико-механічні характеристики випробуваного бетону для зразків групи I

Склад бетону	Кубикова міцність, МПа	Призмova міцність $f_{ck,prism}$, МПа	Модуль дефрмацій $E_b \times 10^{-4}$ МПа	Коефіцієнт Пуассона ν
1	26,8	18,8	1,98	0,16
2	82,3	64,2	2,20	0,14
3	98,7	80,0	2,40	0,13

Механічні характеристики металу для зразків групи II визначалися за тою ж методикою, що й для попередньої групи.

В якості труби-оболонки прийняті цільнотягнуті труби із зовнішнім діаметром $D = 219$ мм при товщині стінки труби $t = 4$ мм. Для поздовжнього стрижневого армування прийняті шість стрижнів періодичного профілю класу А-III з діаметром $d = 12$ мм. У результаті випробувань устанавлено, що для сталі труби межа плинності $R_y = 309$ МПа, тимчасовий опір $R_u = 384$ МПа, модуль пружності $E_s = 2,1 \times 10^5$ МПа.

Для випробування арматури на розтяг використовувалися стандартні стрижні довжиною 200 мм. У результаті випробувань устанавлено, що для арматури межа плинності $R_y = 491$ МПа, тимчасовий опір $R_u = 611$ МПа, модуль пружності $E_s = 2,1 \times 10^5$ МПа.

За результатами випробування на стиск стандартних призм визначені значення призової міцності, модуля пружності та коефіцієнта Пуассона бетону. Для кожного складу бетону їх значення наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Фізико-механічні характеристики випробуваного бетону для зразків групи II

Склад бетону	Кубикова міцність, МПа	Призмова міцність $f_{ck,prism}$, МПа	Модуль деформцій $E_b \times 10^{-4}$ МПа	Коефіцієнт Пуассона ν
1	15,1	13,9	1,25	0,17
2	27,6	24,3	2,00	0,16
3	33,6	29,0	2,13	0,17

Таким чином, під час експерименту вимірювалися поздовжні й поперечні деформації зразків при осьовому завантаженні.

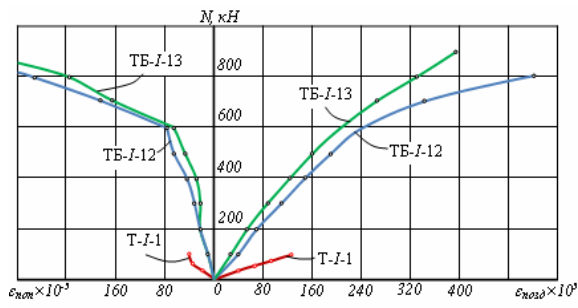


Рис. 1. Залежність деформацій ϵ від навантаження N в зразках серій ТБ-І-12, ТБ-І-13, Т-І-1

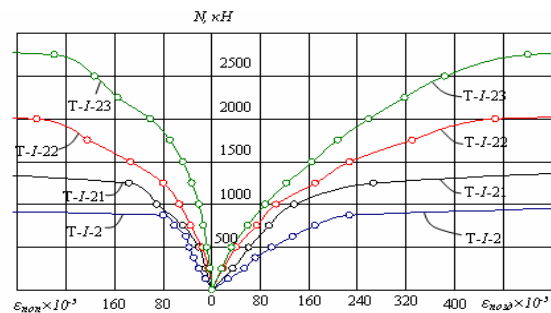


Рис. 2. Залежність деформацій ϵ від навантаження N в зразках серій ТБ-І-21, ТБ-І-22, ТБ-І-23, і Т-І-2

Аналізуючи особливості розвитку деформацій під навантаженням для зразків групи I, із графіків (зображених на рис. 1-3), що побудовані за результатами експериментів видно, що поздовжні й поперечні залежності $N-\epsilon$ носять криволінійний характер. Поздовжні деформації протягом завантаження досягали значних величин, до $\epsilon=600 \times 10^{-5}$, в той час, коли деформації плинності сталі досягаються при деформаціях в $200-220 \times 10^{-5}$.

Значної величини досягали й поперечні деформації, вони досягали величини 300×10^{-5} .

Це свідчить про те, що бетонне ядро в цих зразках знаходилося в об'ємному напруженому стані.

На рис. 1-3 наведено також залежності $N-\epsilon$ для порожніх труб серій Т-І-1, Т-І-2, Т-І-3. На відміну від трубобетонних елементів, ці залежності носили лінійний характер, максимальні поздовжні деформації зразків серії Т-І-1 досягали значення 120×10^{-5} , що значно менше величини деформацій, які характеризують межу плинності сталі.

Це пояснюється тим, що порожні зразки з труб серії Т-І-1 втрачали свою несучу здатність в результаті втрати місцевої стійкості стінок. На відміну від попереднього випадку, максимальні поздовжні деформації зразків серій Т-І-2 та Т-І-3 мали значення 600×10^{-5} , що значно більше величини деформацій, які характеризують межу плинності сталі.

Це пояснюється тим, що порожні зразки з труб даних серій не втрачали свою несучу здатність в результаті втрати місцевої стійкості стінок.

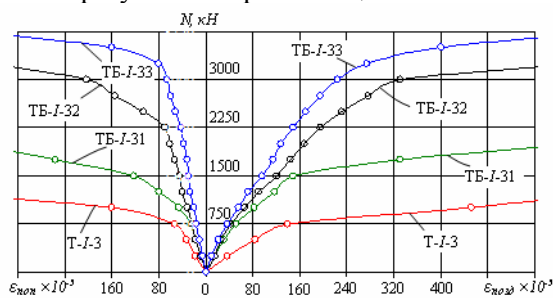


Рис. 3. Залежність деформацій ϵ від навантаження N в зразках серій ТБ-І-31, ТБ-І-32, ТБ-І-33 і Т-І-3

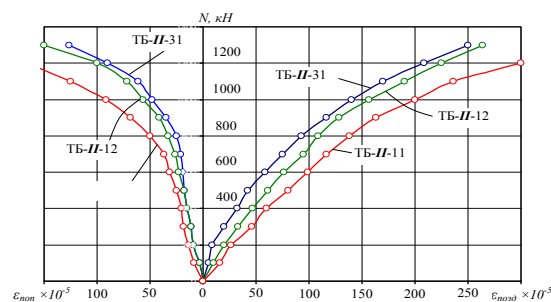


Рис. 4. Залежність деформацій ϵ від навантаження N в зразках серій ТБ-ІІ-11, ТБ-ІІ-12, ТБ-ІІ-13

Із аналізу графіків, представлених на рис. 4, видно, що з самого початку завантаження ця залежність носить криволінійний характер.

Оскільки бетонне ядро армоване поздовжньою арматурою, то міцність бетону незначно впливає на величину деформацій та характер їх розвитку. Як і при неармованих осердях, відносні граничні поздовжні деформації мають великі значення і досягають $= 300 \times 10^{-5}$ і більше. Поперечні деформації також мають криволінійний характер.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Із графіків деформування трубобетонних елементів із осердям з високоміцного бетону видно, що незалежно від геометричних характеристик труб та міцності бетону, поздовжні й поперечні деформації мають однаковий характер.

При цьому, особливості деформування таких елементів приблизно такі ж, як і при бетонах звичайної міцності, але характер руйнування зовсім інший, хрумкий, в результаті виникнення нахиленої тріщини в бетонному ядрі, що негативно позначається на їх надійності.

Також можна зробити висновок, що армування бетонного осердя поздовжньою стрижневою арматурою впливає як на несучу здатність трубобетонних елементів, так і на об'ємний стан бетонного ядра.

За рахунок армування осердя поздовжньою стрижневою арматурою можна значно підвищити як міцність осердя, так і несучу здатність трубобетонного елемента в цілому.

Але ефективність роботи бетону осердя в цьому випадку дещо зменшується.

При визначенні, який спосіб зміцнення осердя необхідно приймати при проектуванні конструкції, слід враховувати індивідуально як особливості умов роботи конструкції, так і її техніко-економічні показники.

Список літератури

1. **Передерій Г.П.** Трубчатая арматура / **Г.П. Передерій**. – М.: Трансжелдориздат, 1954. – 90 с.
2. **Стороженко Л.І.** Розрахунок трубобетонних конструкцій при короткочасній і довготривалій дії навантаження / **Л.І. Стороженко, В.М. Сурдін**. – Київ: Будівельник, 1972. – 132 с.
3. **Стороженко Л.І.** Эффективность сжатых элементов с различными способами армирования / **Л.И. Стороженко** // Изв. вузов «Строительство и архитектура». – 1981. – №6. – С. 26-29.
4. **Стороженко Л.И.** Расчёт трубобетонных конструкций / **Л.И. Стороженко, П.И. Плахотный, А.А. Черный**. – К.: Будівельник, 1991. – 120 с.
5. **Стороженко Л.И.** Объемное напряженно-деформированное состояние железобетона с косвенным армированием: дис. ... д-ра техн. наук / **Л.И. Стороженко**. – Кривой Рог, 1985. – 503 с.
6. **Стороженко Л.І.** Трубобетонні конструкції промислових будівель **Л.І. Стороженко, В.Ф. Пенц, С.Г. Коршун**. – Полтава: ПолтНТУ, 2008. – 202 с.
7. **Стороженко Л.І.** Залізобетонні конструкції в незнімній опалубці / **Л.І. Стороженко, О.І. Лапенко**. – Полтава: АСМІ, 2008. – 312 с.
8. **Сурдін В.М.** Исследование напряженно-деформированного состояния трубобетонных элементов при осевом нагружении с учетом реологических процессов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / **В.М. Сурдин**. – Одесса: ОИСИ, 1970. – 21 с.
9. **Сурдін В.М.** Дослідження ефективності роботи бетонного ядра стиснутих трубобетонних елементів / **В.М. Сурдін, В.І. Єфіменко, О.П. Сухан** // Міжвідомчий наук.-техн. збірник "Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація". Зб. наук. праць. – Київ: НДІБК, 2006. – Вип. 65. – С. 205-208.
10. **Єрмоленко Д.А.** Трубобетонні елементи зі стрижневою арматурою / **Д.А. Єрмоленко** // Зб. наук. ст. "Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація". – Вип. 5. – Кривий Ріг: КТУ, 2002. – С. 53-56.
11. **Єрмоленко Д.А.** Об'ємний напружено-деформований стан трубобетону / **Д.А.Єрмоленко** // Збірник наукових статей "Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація". – Кривий Ріг, 2008. – Вип.8. – С. 322-327.
12. **Єрмоленко Д.А.** Об'ємний напружено-деформований стан трубобетонних елементів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / **Д.А. Єрмоленко**. – Полтава, 2012. – 40 с.
13. **Ефименко В.И.** Прочность и деформации изгибаемых трубобетонных элементов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / **В.И. Ефименко**. – Минск, 1989. – 21 с.

Рукопис подано до редакції 20.03.14