

УДК 624.074:[624.012.4+624.014.2]

*В.Ф. Пенц, к.т.н., доцент*

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

**РОБОТА ТРУБОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
НА ЦЕНТРАЛЬНИЙ ТА ПОЗАЦЕНТРОВИЙ РОЗТЯГ:  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

*Наведено конструкції зразків, методика проведення випробування і результати експерименту при роботі трубобетонних елементів на розтяг, описано характер розвитку деформацій.*

**Ключові слова:** *трубобетонні елементи, розтяг, деформації.*

УДК 624.074:[624.012.4+624.014.2]

*В.Ф. Пенц, к.т.н., доцент*

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

**РАБОТА ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
НА ЦЕНТРАЛЬНОЕ И ВНЕЦЕНТРЕННОЕ РАСТЯЖЕНИЕ:  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

*Приведены конструкции образцов, методика проведения испытания и результаты эксперимента при работе трубобетонных элементов на растяжение, описан характер развития деформаций.*

**Ключевые слова:** *трубобетонные элементы, растяжение, деформации.*

UDC 624.074:[624.012.4+624.014.2]

*V. F. Pents, PhD, Associate Professor*

*Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

**WORK OF THE CONCRETE FILLED STEEL TUBE ELEMENTS ON  
AXIAL AND ECCENTRIC TENSION: EXPERIMENTAL RESEARCH**

*The article gives structures of the samples, procedure for testing and experimental results at the work of the concrete filled steel tube elements in tension. It also describes character of strains development*

**Keywords:** *concrete filled steel tube elements, tension, strains.*

**Вступ.** Ефективність будівельних конструкцій зумовлюється витратами матеріалів, необхідних для виробництва, витратами праці, вартістю. Як показує досвід проектування і будівництва конструкцій, при застосуванні трубобетону досягається економія матеріалів, витрат праці та вартості. Високу економічну ефективність трубобетонних конструкцій доведено в роботах Л.І. Стороженка, А.І. Кікіна [4 – 6].

Трубобетонні конструкції надійні в експлуатації, про що свідчить їх здатність у граничному стані не втрачати несучої здатності миттєво, а ще деякий час витримувати навантаження. Це підтверджено багатьма дослідженнями, виконаними В.А. Росновським [3], О.А. Долженком, Л.І. Стороженком [4, 5] та іншими. Вони встановили, що при досягненні

великих деформацій трубобетонні стержні й далі можуть витримувати значне навантаження.

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** На сьогодні в нашій країні накопичено значний досвід із дослідження та впровадження трубобетонних конструкцій. Вивчено роботу трубобетону на стиск, а детальне дослідження трубобетону в цілому й окремо його складових на розтяг проведено обмежено. Упровадження ефективних конструкцій у будівництві, до яких належить трубобетон, потребує більш детального вивчення особливостей їх роботи. Результати дослідження, описані в цій статті, можуть бути використані при проектуванні конструкцій, у яких трубобетонні елементи працюють на розтяг, а саме при спорудженні наскрізних колон, ферм тощо. Відсутність рекомендацій із розрахунку й проектування таких конструкцій значною мірою обмежує їх масове використання в будівництві. Таким чином, завдання з дослідження трубобетону при його роботі на розтяг є актуальним.

Стиснутим трубобетонним елементам присвячено багато дослідних робіт [3 – 6, 9], проте дослідження розтягнутих трубозалізобетонних елементів виконувалися деякими вченими. У попередніх роботах [1, 2] подавалося конструктивне рішення розтягнутого трубобетонного елемента, в основі якого знаходиться сталева труба, заповнена бетоном і армована високоміцною звичайною або попередньо напруженою стержневою арматурою. У роботах авторів [7, 8] подано експериментальні дослідження особливостей роботи під навантаженням і характер втрати несучої здатності розтягнутих трубобетонних зразків залежно від процента армування й схеми навантаження позацентровою поздовжньою силою з визначеними ексцентриситетами.

**Мета** полягає в дослідженні роботи трубобетонних елементів на розтяг залежно від фізико-механічних характеристик випробувальних матеріалів, схем навантаження та характеру втрати їх несучої здатності.

**Основний матеріал і результати.** Для виконання поставлених завдань було складено методику проведення експерименту та визначено кількість і якість дослідних зразків. Досліджувалися короткі трубобетонні зразки зі сталевих заповнених важким бетоном труб і зразки зі сталевих порожніх труб із довжиною 400 мм. Для дослідження приймалися серії зразків, наведені в табл. 1.

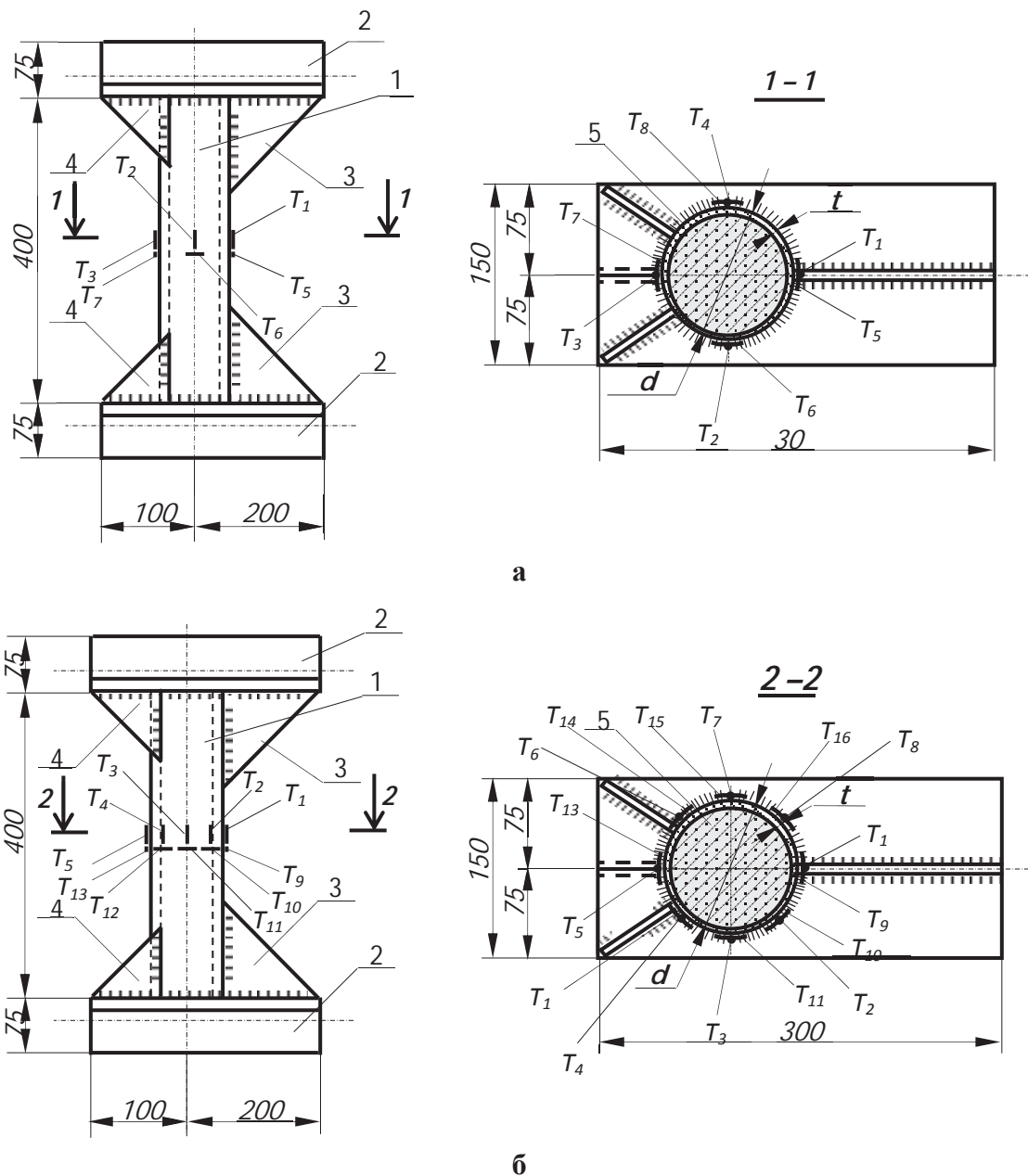
Експериментальні зразки досліджувалися на центральній і позацентровій розтяг з різними ексцентриситетами у 25, 50 мм з метою оцінювання зміни напружено-деформованого стану і несучої здатності досліджуваних елементів зі зміною ексцентриситету. Випробування дослідних зразків відбувалося при передачі навантаження розтягу через зварені у тавр два рівнополічних кутики 75х6 мм з обох їх кінців на розривній машині потужністю 1000 кН марки УИМ-100.

**Таблиця 1 – Програма експериментальних досліджень зразків**

№ з/п	Шифр серії зразка	Характеристика зразка					Ексцентриситет, мм	Несуча здатність N, кН				
		Труба			Бетон							
		Зовнішній діаметр, мм	Внутрішній діаметр, мм	Площа поперечного перерізу, см <sup>2</sup>	Клас бетону	Міцність бетону, МПа						
1	ТР-1	108	98	16,2	-	-	-	564				
2	ТР-1						50	204				
3	ТР-2						101	11,5	-	-	-	400
4	ТР-2										50	144
5	ТР-3	102	94	12,3	-	-	-	430				
6	ТР-3						25	221				
7	ТР-3						50	149				
8	ТР-4	89	81,4	10,2	-	-	-	355				
9	ТР-4						50	112				
10	ТБ-11	108	98	16,2	В15	12,2	-	621				
11	ТБ-11						50	224				
12	ТБ-21						101	11,5	В15	12,2	-	441
13	ТБ-21										50	158
14	ТБ-31	102	94	12,3	В15	12,2	-	473				
15	ТБ-31						25	243				
16	ТБ-31						50	164				
17	ТБ-32	102	94	12,3	В20	14,3	-	473				
18	ТБ-32						50	164				
19	ТБ-33	102	94	12,3	В25	16,4	-	473				
20	ТБ-33						50	164				
21	ТБ-41	89	81,4	10,2	В15	12,2	-	390				
22	ТБ-41						50	124				

Перед дослідженням зразків визначалися фізико-механічні й деформативні властивості металу труби та бетону. Для проведення експерименту використовувалися вирізані з труб відрізки довжиною 400 мм і шириною 20 мм, бетонні призми з розмірами 100x100x400 мм.

Прикладення навантаження на зразки здійснювалося ступенями в 0,1 – 0,05 від граничного зусилля. На всіх ступенях завантаження вимірювалися поздовжні та поперечні деформації. Вимірювання деформацій здійснювалося за допомогою електротензорезисторів, схему розміщення яких показано на рис. 1. Ця схема передбачала вимірювання деформацій в одному перерізі.



**Рис. 1 – Конструкція дослідних зразків та схеми розміщення електротензорезисторів (т) для вимірювання поперечних і поздовжніх деформацій у зразку при випробуванні на а) центральний розтяг; б) позацентричний розтяг:**

- 1 – сталевая труба; 2 – зварені у тавр два кутики 75х6;**
- 3, 4 – сталеві ребра жорсткості з листа товщиною 8 мм; 5 – важкий бетон**

На рис. 2, 3 зображено загальний вигляд зразків, прийнятих до випробування, з наклеєними електротензорезисторами та під час їх випробування на розривній машині УВМ-100, вигляд бетонного ядра у зразку серії ТБ-31 після випробування.

За граничний на розтяг приймали стан конструкції, коли поздовжні деформації трубобетонного елемента відповідатимуть деформаціям сталі, за яких будуть досягнуті напруження текучості.



**Рис. 2 – Загальний вигляд зразків, прийнятих до випробування, з наклеєними електротензорезисторами та під час випробування на розривній машині УВМ-100**

При випробуванні експериментальні зразки, які мали різні відсотки армування, класи бетону, ексцентриситет прикладення навантаження, вирізнялися за несучою здатністю, яка наведена в табл. 1. Для оцінювання ефективності сумісної роботи матеріалів у труботетонних елементах розраховувалися два коефіцієнти ефективності з урахуванням об'ємного напруженого стану.



**Рис 3 – Вигляд бетонного ядра у зразку серії ТБ-31 після випробування**  
**1. Коефіцієнт ефективності роботи бетонного ядра в трубі**

$$\eta = \frac{\sigma_{bt}}{R_{bt}}, \quad (1)$$

де  $R_{bt}$  – міцність бетону на розтяг, не підсиленого обіймою;

$\sigma_{bt}$  – напруження в бетоні при досягненні зразком граничного стану за несучою здатністю.

Визначення  $\sigma_{bt}$  в умовах випробування трубобетонного розтягнутого елемента здійснюється за умови, що відома несуча здатність порожньої труби, за формулою

$$\sigma_{bt} = \frac{N_{bt}}{A_b}, \quad (2)$$

де  $N_{bt}$  – несуча здатність бетонного ядра трубобетонного елемента;  
 $A_b$  – площа поперечного перерізу бетонного ядра.

2. Коефіцієнт ефективності елемента в цілому

$$m = \frac{N_{sbt}}{N_{st}}, \quad (3)$$

де  $N_{sbt}$  – несуча здатність трубобетонного елемента;

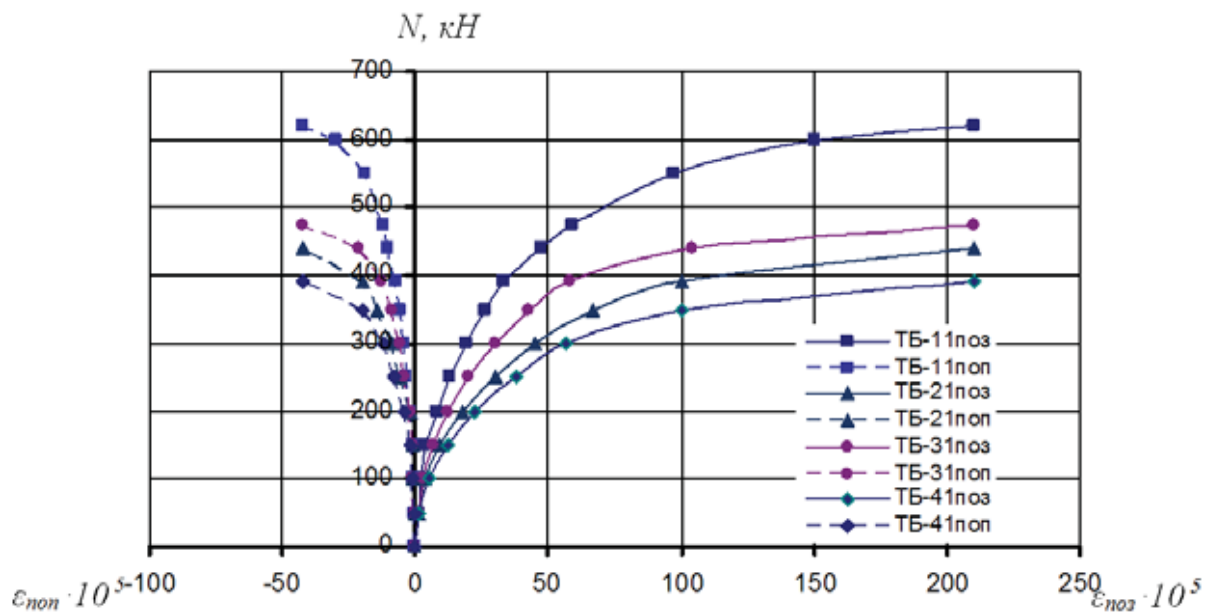
$N_{st}$  – несуча здатність труби-оболонки трубобетонного елемента.

З аналізу значень коефіцієнтів  $m = 1,1$  і  $\eta = 0,96$  встановлено, що трубобетонні елементи мають несучу здатність у 1,1 разу вищу, ніж елементи зі сталевих труб, не заповнених бетоном. У процесі дослідження трубобетонних зразків на позацентричний розтяг установлено залежність несучої здатності від зміни ексцентриситету прикладання до них зусилля розтягу.

Несуча здатність таких зразків по відношенню до їх аналогів, які випробувалися на центральний розтяг, є меншою відповідно в 2,77; 2,79; 2,88; 3,15 разу. При обробленні експериментальних даних визначено розміщення нейтральної лінії, яка розділяє зразки на розтягнуту і стиснуту зони. Відносне значення стиснутої зони до діаметра труби  $x/d$  для зразків серій ТР-1, ТР-2, ТР-3, ТР-4, ТБ-11, ТБ-21, ТБ-31, ТБ-41 відповідно становила 0,217; 0,221; 0,234; 0,268. У процесі дослідження трубобетонних зразків на позацентричний розтяг установлено залежність несучої здатності зразків від зміни ексцентриситету прикладання до них зусилля розтягу. Так, після випробування зразків серії ТБ-31, які мають однакові геометричні та фізико-механічні характеристики, визначено, що зі збільшенням ексцентриситету з 0 до 50 мм несуча здатність зразка зменшувалася. Отже, можна зробити висновок, що несуча здатність зразка зворотно пропорційна величині ексцентриситету прикладання зусилля розтягу.

У процесі випробування зразків із різними геометричними характеристиками на центральний розтяг встановлено, що поздовжні й поперечні деформації рівномірно змінювалися при збільшенні навантаження, характер їх розподілу є однаковим (рис. 4).

Значення всіх поздовжніх деформацій є додатними, а всіх поперечних – від’ємними, і їх максимальні значення та значення напружень при досягненні зразками межі текучості відповідно становили  $\varepsilon_{noz}=210\cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_s=428$  МПа і  $\varepsilon_{non}=42\cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_s=86$  МПа для зразків серій ТБ-11, ТБ-21, ТБ-31, ТБ-41.



**Рис. 4 – Графік зростання поперечних і поздовжніх деформацій у процесі навантаження на центральний розтяг у зразках серій ТБ-11, ТБ-21, ТБ-31, ТБ-41**

При випробуванні базового зразка серії ТБ-31 на позacentровий розтяг з прикладанням зусилля з ексцентриситетом у 25 мм деформації та напруження в найбільш розтягнутій точці складають  $\varepsilon_{noz}=210\cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_s=428$  МПа і  $\varepsilon_{non}=42\cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_s=86$  МПа, а в найменш розтягнутій –  $\varepsilon_{noz}=6\cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_s=12$  МПа і  $\varepsilon_{non}=1\cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_s=2$  МПа (рис. 5).

Відповідно при випробуванні зразків серій ТБ-11, ТБ-21, ТБ-31, ТБ-41 на позacentровий розтяг з прикладанням зусилля з ексцентриситетом у 50 мм деформації та напруження в найбільш розтягнутій точці складають  $\varepsilon_{noz}=210\cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_s=428$  МПа і  $\varepsilon_{non}=42\cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_s=86$  МПа, а в найбільш стиснутій –  $\varepsilon_{noz}=60\cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_s=122$  МПа і  $\varepsilon_{non}=16\cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_s=33$  МПа (рис. 6). Це свідчить про те, що в трубобетонних зразках при роботі на позacentровий розтяг з ексцентриситетом у 50 мм зі сторони прикладання зусилля виникають напруження розтягу, а з протилежної сторони – стиску і зразки досягли межі текучості за рахунок максимального значення поздовжніх деформацій розтягу, а саме при  $\varepsilon_{noz}=210\cdot 10^{-5}$ .

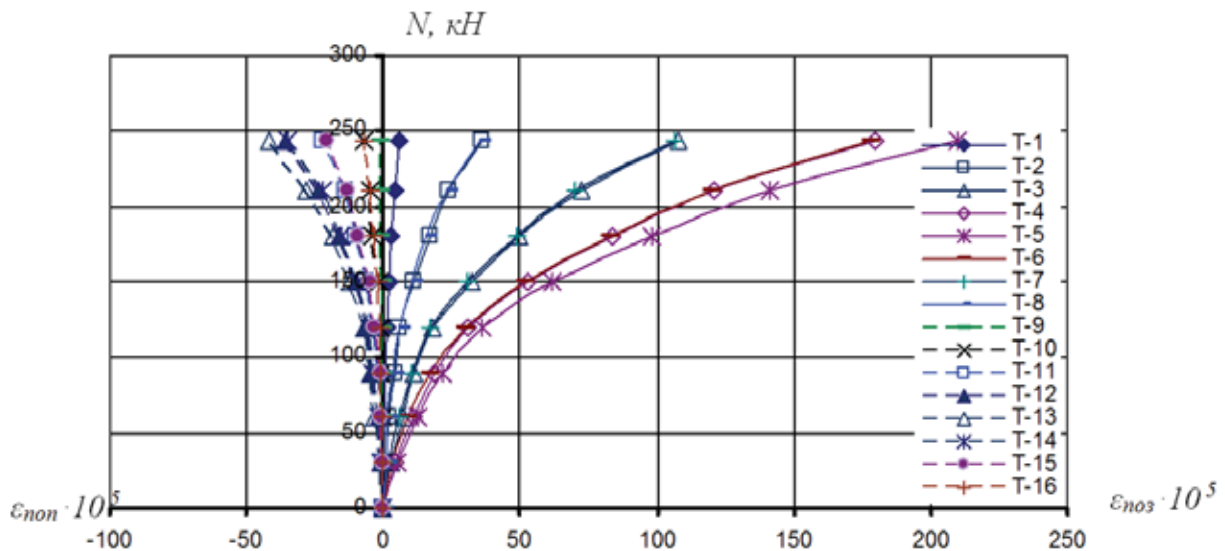


Рис. 5 – Графік зростання поперечних і поздовжніх деформацій у процесі навантаження на позacentровий розтяг у зразках серії ТБ-31 з ексцентриситетом 25 мм

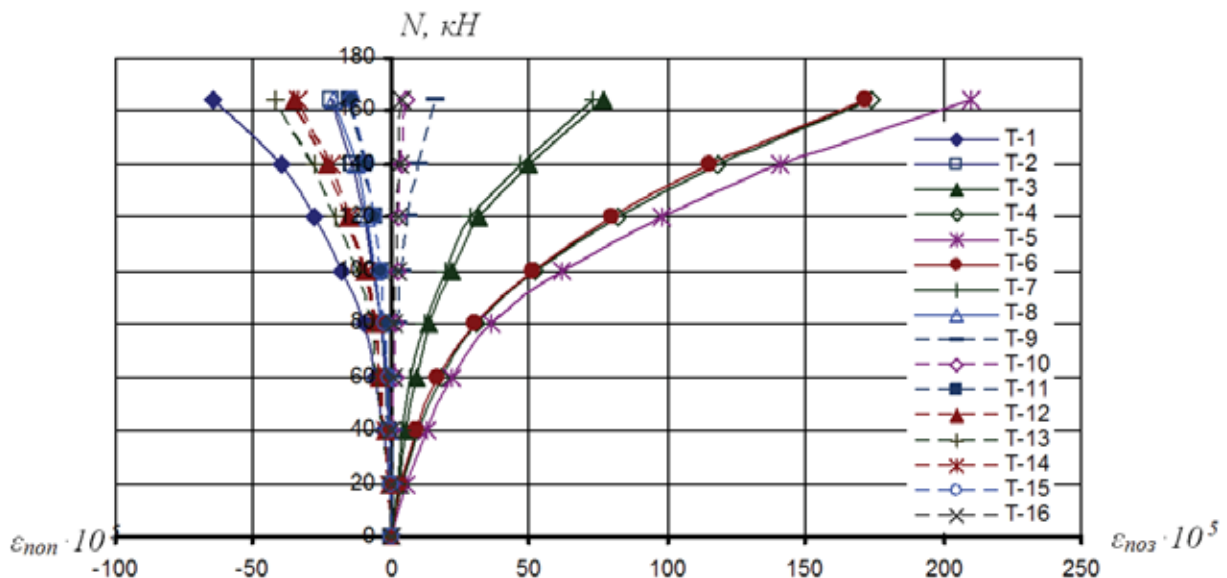


Рис. 6 – Графік зростання поперечних і поздовжніх деформацій у процесі навантаження на позacentровий розтяг у зразках серії ТБ-31 з ексцентриситетом 50 мм

При обробці експериментальних даних визначено розміщення нейтральної лінії, яка розділяє зразки на розтягнуту та стиснуту зони. Відносне значення стиснутої зони до діаметра труби  $x/d$  для зразків серій ТБ-11, ТБ-21, ТБ-31, ТБ-41 відповідно становило 0,217; 0,221; 0,234; 0,268. Ознак нейтральної лінії при випробуванні зразків серії ТБ-31 на позacentровий розтяг з ексцентриситетом у 25 мм не спостерігалось. Це означає, що зразки вздовж усієї довжини працюють на розтяг, а на всьому своєму поперечному перерізі – на стиск, хоча і не рівномірно (рис. 7).



Після випробування в трубобетонних зразках серії ТБ-31 була вирізана частина труби-оболонки з метою огляду стану бетонного ядра та встановлено утворення рівномірно розташованих на всій довжині зразків поперечних тріщин, відстань між якими знаходиться в межах 22 – 27 мм.

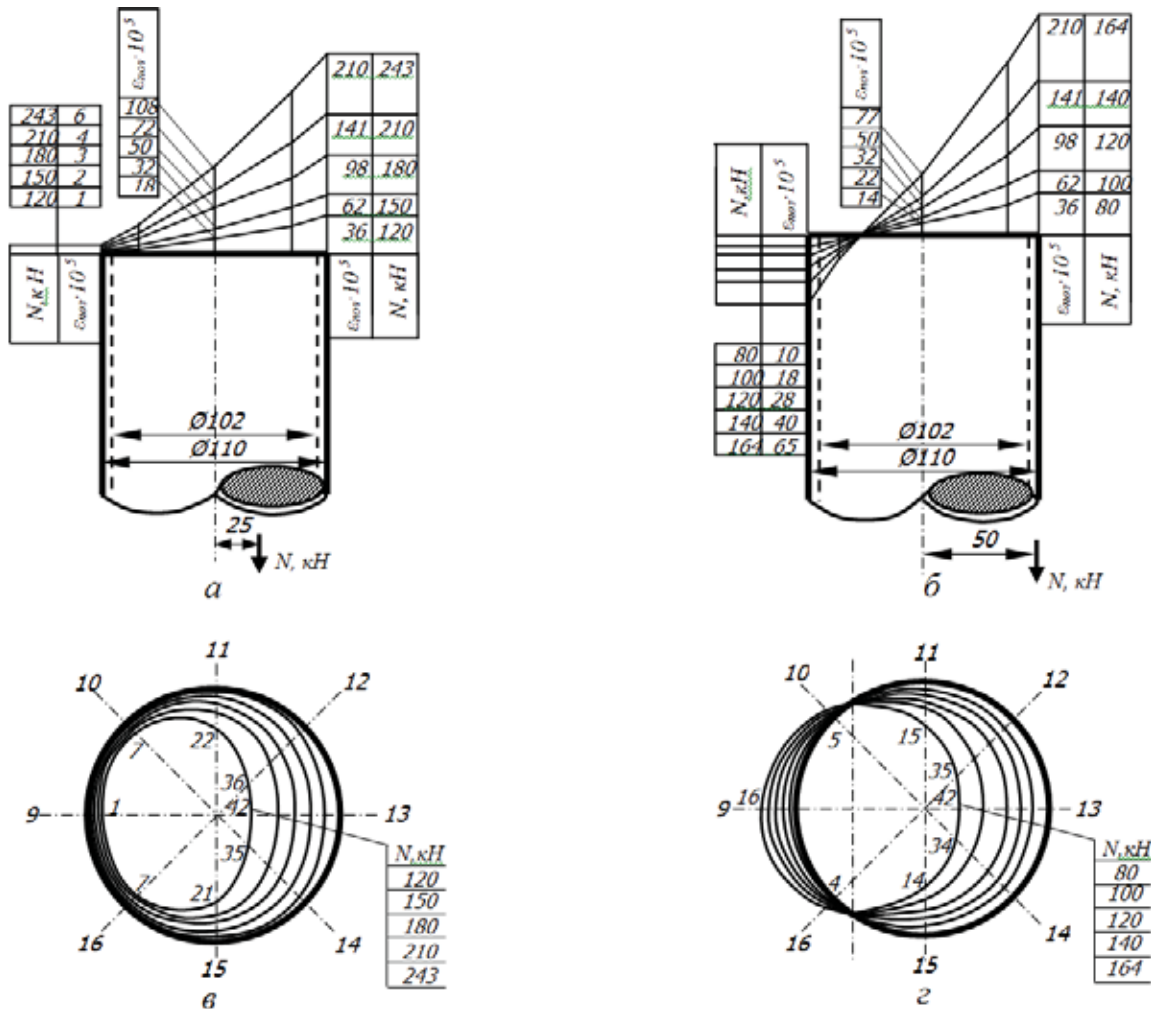


Рис. 7 – Епюри поздовжніх та поперечних деформацій у процесі навантаження на позацинтрний розтяг у зразках серій:  
а, в – ТБ-31  $e=25$  мм; б, г – ТБ-31  $e=50$  мм

### Висновки:

1. Критерієм несучої здатності трубобетонних елементів для роботи на розтяг вважається доцільним приймати досягнення в оболонці значень поздовжніх деформацій, які відповідають межі текучості сталі.

2. Несуча здатність трубобетонного елемента залежить від його геометричних, фізико-механічних характеристик матеріалів, відсотка армування й ексцентриситету прикладання зусилля розтягу.

3. Для оцінювання ефективності роботи бетонного ядра в трубобетонних зразках запропоновано коефіцієнт  $\eta$ , який являє собою відношення максимальних напружень у бетоні в момент досягнення зразком граничної межі несучої здатності до його міцності на розтяг, і

коефіцієнт  $m$ , котрий показує те, наскільки підвищується несуча здатність трубобетонного елемента при сумісній роботі бетону і сталі порівняно з несучою здатністю ядра й оболонки, випробуваних окремо. При розтягу значення коефіцієнтів ефективності становило  $\eta = 0,96-0,97$  та  $m = 1,1$  в усіх трубобетонних зразках.

4. У роботі досліджуваних на розтяг трубобетонних зразків серій ТБ-31, ТБ-32, ТБ-33 сталь несе основне навантаження із самого початку до втрати несучої здатності. Після досягнення оболонкою межі текучості вже зруйноване бетонне ядро перешкоджає розвитку поперечних деформацій стиску в трубі та швидшій втраті нею несучої здатності порівняно з порожньою трубою, що підвищує загалом несучу здатність усього елемента. Клас бетону за міцністю на розтяг практично не впливає на несучу здатність трубобетонного елемента.

5. Деформації трубобетонного елемента в цілому мають однаковий характер розвитку. На початку завантаження залежність  $N - \varepsilon$  для всіх трубобетонних зразків була прямолінійною. Викривлення діаграм  $N - \varepsilon$  спостерігалось при  $\varepsilon_{\text{поз}}=(50 - 80) \cdot 10^{-5}$  та  $\varepsilon_{\text{нон}}=(10 - 25) \cdot 10^{-5}$ .

6. При ексцентриситетах  $e=0-25$  мм трубобетонний елемент працює на розтяг на всій площі свого поперечного перерізу, при  $e = 50$  мм з боку прикладання зусилля виникають напруження розтягу, а з протилежного – стиску.

7. Наведені результати експериментальних даних свідчать про сумісну роботу сталевих труб і бетону, що істотно важливо для нормальної експлуатації несучих конструкцій при їх роботі на розтяг, і це необхідно брати до відома при проектуванні елементів такого типу.

#### Література

1. Клименко, К.Ф. Міцність і деформативність розтягнутих попередньо напружених трубозалізобетонних елементів / К.Ф. Клименко // Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: зб. наук. ст. – Кривий Ріг: КТУ, 2002. – Вип.5. – С. 17 – 24.
2. Клименко, К.Ф. Деформативність попередньо напружених центрально розтягнутих трубозалізобетонних елементів / К.Ф. Клименко // Вісник Львівського держ. аграрного ун-ту «Архітектура і сільськогосподарське будівництво». – Львів: ЛДАУ, 2002. – № 3. – С. 27 – 34.
3. Росновский, В.А. Трубобетон в мостостроении / В.А. Росновский. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – 110 с.
4. Стороженко, Л.И. Трубобетонные конструкции / Л.И. Стороженко. – К.: Будівельник, 1978. – 82 с.
5. Стороженко, Л.И. Железобетонные конструкции с внешним армированием / Л.И. Стороженко. – К.: УМК ВО, 1989. – 99 с.
6. Кикин, А.И. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном / А.И. Кикин, Р.С. Санжаровский, Г.А. Труль. – М.: Госстройиздат, 1974. – 146 с.

7. Пенц, В.Ф. Експериментальні дослідження трубобетону при його роботі на позацентровий розтяг / В.Ф. Пенц, П.В. Туржанський // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2006. – Вип. 17. – С. 83 – 91.

8. Пенц, В.Ф. Експериментальні дослідження бетонного ядра трубобетонного елемента при його роботі на розтяг / В.Ф. Пенц, П.В. Туржанський // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. / Національний університет водного господарства та природокористування. – Вип. 13. – Рівне, 2005. – С. 237 – 241.

9. Hsuan-Teh Hu, Chiung-Shiann Huang, Ming-Hsien Wu, Yih-Min Wu. *Nonlinear Analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect.* / *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2003. – P. 1322 – 1329.

Надійшла до редакції 23.04.2014  
©В.Ф. Пенц