

УДК 624.016

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОМІЦНОГО БЕТОНУ В ТРУБОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Д-р техн. наук Д. А. Єрмоленко, канд. техн. наук О. В. Демченко (ПолтНТУ)

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА В ТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Д-р техн. наук Д. А. Ермоленко, канд. техн. наук О. В. Демченко (ПолтНТУ)

## EVALUATION OF EFFICIENCY OF HIGH-STRENGTH CONCRETE IN FILLED STEEL TUBES

Dr. tehn. sciences D. A. Yermolenko, Ph.D., PhD tehn. O. V. Demchenko

*У статті наведено результати оцінки ефективності застосування високоміцних бетонів у сталобетонних конструкціях на основі експериментальних досліджень коротких центрально-стиснутих трубобетонних елементів. Визначено несучу здатність, відносні деформації, проаналізовано систему коефіцієнтів ефективності роботи бетонів у трубобетоні залежно від способу завантаження та міцності бетонного осердя.*

**Ключові слова:** трубобетон, високоміцний бетон, несуча здатність, коефіцієнт ефективності.

*В статье приведены результаты оценки эффективности использования высокопрочных бетонов в сталобетонных конструкциях на основе экспериментальных исследований коротких центрально-сжатых трубобетонных элементов. Определено несущую способность, относительные деформации, проанализировано систему коэффициентов эффективности работы бетонов в трубобетоне в зависимости от способа загрузки и прочности бетонного сердечника.*

**Ключевые слова:** трубобетон, высокопрочный бетон, несущая способность, коэффициент эффективности.

*The article gives the results of evaluation of efficiency of high-strength concretes in composite steel-concrete constructions based on experimental researches of shot axial-compressed concrete felled steel tube elements. It has been defined the carrying capacity and relative strains. It has been analyzed the system of coefficients of concrete effectiveness in concrete felled steel tube according to dependence on loading way and strength of concrete core.*

**Keywords:** concrete filled steel tube, high-strength concrete, carrying capacity, coefficient of efficiency.

**Вступ.** Трубобетонні конструкції складаються зі сталеві труби і бетонного ядра, що працюють спільно. Такі конструкції характеризуються багатьма позитивними якостями. При відносно малому поперечному перерізі вони здатні витримувати великі зусилля, а бетон у

таких конструкціях за рахунок об'ємного напруженого стану сприймає подовжні напруження, що значно перевищують його призову міцність. Останнім часом на великих будівництвах Західної Європи, США, Китаю, Японії все частіше зустрічаються трубобетонні конструкції

[1, 3]. Трубобетонні конструкції ефективні при великих стискаючих навантаженнях, тому мають меншу витрату металу і бетону в порівнянні із звичайними залізобетонними стрижнями. В таких конструкціях відкривається широка можливість для використання сучасних високоміцних бетонів. Тут практично подолано один з основних недоліків таких бетонів – їх високу крихкість [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато досліджень спрямовано на отримання балансу між міцністю труби-оболонки та міцністю бетонного ядра на несучу здатність трубобетонного елемента. З тим, що вплив міцності сталі на міцність трубобетону суттєвий, погоджуються всі дослідники. Але щодо впливу міцності бетону погляди розділяються. Ю. В. Сітніков вважає, що більш ефективним є використання високих класів бетону та сталей низької міцності, а О. А. Долженко, Л. І. Стороженко, В. М. Сурдін [4] переконують, що більш ефективно застосовувати бетони невисоких класів. У трубобетонних елементах застосовувалися в основному бетони класів за міцністю на стиск С12/15 – С32/40. Однак застосування бетонів класів за міцністю на стиск більше С40/50 майже не досліджувалося. Крім того, підвищити ефективність роботи елементів на осьовий стиск можна за рахунок зміни структури бетонного ядра і його композиційної основи, які істотно впливатимуть на деформативні властивості [5].

У нашій країні значному поширенню трубобетонних конструкцій перешкоджає ряд причин, основною серед яких є відсутність вітчизняних норм проектування трубобетонних конструкцій. Удосконалення трубобетонних конструкцій пов'язано, по-перше, із застосуванням високоміцних бетонів, що дасть змогу істотно знизити розміри поперечних перерізів, а отже, і загальні витрати на будівництво, і, по-друге, із забезпеченням найбільш

сприятливих умов спільної роботи бетонного ядра і сталеві оболонки на всіх етапах навантаження [6].

**Визначення мети та задачі дослідження** Метою досліджень було оцінити ефективність застосування в трубобетонних конструкціях високоміцного бетону, які виготовлено із застосуванням вітчизняної бази будівельних матеріалів. Для цього ставились такі задачі: провести експериментальні дослідження коротких трубобетонних елементів при різних способах передачі навантаження та різній міцності бетонного осердя; на основі аналізу напружено-деформований стану та несучої здатності стиснутих конструктивних елементів оцінити ефективність застосування високоміцного бетону в трубобетонних конструкціях.

**Основна частина дослідження.** Відповідно до завдання було розроблено програму експериментальних досліджень [8], яка передбачала випробовування міцності трубобетонних елементів різних серій стискаючим поздовжнім зусиллям залежно від міцності бетонного осердя, товщини оболонки та способу передачі навантаження: ТБ – навантаження передається на комплексний переріз; БВТ – навантаження передається на бетонне осердя.

Для виготовлення зразків було використано сталеві труби діаметром 159 мм із товщиною стінки 3,5 4,0 та 6 мм, що заповнювалися бетоном п'яти класів з різною міцністю [9]. Усі трубобетонні зразки мали довжину 640 мм ( $L/D = 4$ ). Прикладання навантаження здійснювалося ступінчасто в 0,1-0,05 від граничного значення. На всіх ступенях вимірювалися поздовжні і поперечні деформації із застосуванням приладу ВНП-8.

Під час завантаження фіксувалось два характерні для трубобетону зусилля (таблиця): зусилля  $N_1$  – досягнення матеріалом оболонки межі текучості; зусилля  $N_2$  – максимальне зусилля зразків.

Результати випробування дослідних зразків

Серія зразків	Зусилля $N_1$ , кН	Зусилля $N_2$ , кН	Відношення $N_2/N_1$	$m1$	$m2$	$\eta$
ТБ-1-1	875	1250	1,43	0,99	1,28	0,96
ТБ-1-2	1300	1645	1,27	0,94	1,12	0,91
ТБ-1-3	1400	1705	1,22	0,89	1,03	0,85
ТБ-1-4	1450	1810	1,25	0,87	1,03	0,82
ТБ-1-5	1600	1770	1,11	0,86	0,91	0,82
ТБ-2-2	1350	1775	1,31	0,88	1,09	0,81
ТБ-2-3	1500	2020	1,35	0,87	1,11	0,81
ТБ-2-4	1600	2090	1,31	0,88	1,10	0,83
ТБ-2-5	1700	2400	1,41	0,85	1,15	0,80
БВТ-1-6	950	1275	1,34	1,07	1,31	1,11
БВТ-1-7	1500	1530	1,02	1,08	1,04	1,11
БВТ-1-8	1620	1750	1,08	1,03	1,06	1,04
БВТ-1-9	1975	2130	1,08	1,15	1,21	1,20
БВТ-1-10	2050	2275	1,11	1,10	1,17	1,13
ТБ-3-2	1900	2510	1,32	1,04	1,31	1,08
ТБ-3-3	2050	2600	1,27	1,02	1,24	1,04
ТБ-3-4	2100	2740	1,30	1,00	1,25	1,01
ТБ-3-5	2600	3200	1,21	1,14	1,35	1,24

Момент досягнення зусилля  $N_1$  фіксувався за такими ознаками: стрілка зусиллевимірної апаратури «застигала» на певній величині, але при цьому за електротензорезисторами спостерігався приріст відносних деформацій; лакове покриття втрачало «глянець». Далі зусилля продовжувало зростати. Досягнення зусилля  $N_2$  характеризується інтенсивним деформуванням зразка. На час розвантаження довжина зразків зменшувалась на 5-8 % від початкової довжини.

Слід зазначити, що міцність бетонного осердя суттєво впливає на характер розвитку напружено-деформованого стану трубобетонних елементів. Так, у зразках із бетоном високої міцності до зусилля  $N_1$  розвиток деформацій мав лінійний характер (рис. 1).

При завантаженні дослідних зразків на комплексний переріз було зафіксовано, що зі збільшенням міцності бетону

збільшується несуча здатність трубобетону. З цих графіків можна зробити висновки, що зі збільшенням міцності бетонного ядра на 60 % несуча здатність зразків трубобетону збільшилась на 43 %, деформації зростають пропорційно прикладеному зусиллю.

При досягненні величини руйнівного зусилля  $N_2$  усі дослідні зразки мали значне перевищення несучої здатності трубобетонного елемента над сумарною – від 7 до 28 %. А при досягненні зусилля  $N_1$  спосіб передачі навантаження виявився суттєвим фактором, що впливає на ефективність конструктивного трубобетонного елемента із високоміцним бетоном. Спільним при досягненні зусиль  $N_1$  та  $N_2$  є вплив коефіцієнта армування. Так, при його зростанні відбувається збільшення ефективності сумісної роботи труби-оболонки та осердя із високоміцного бетону.

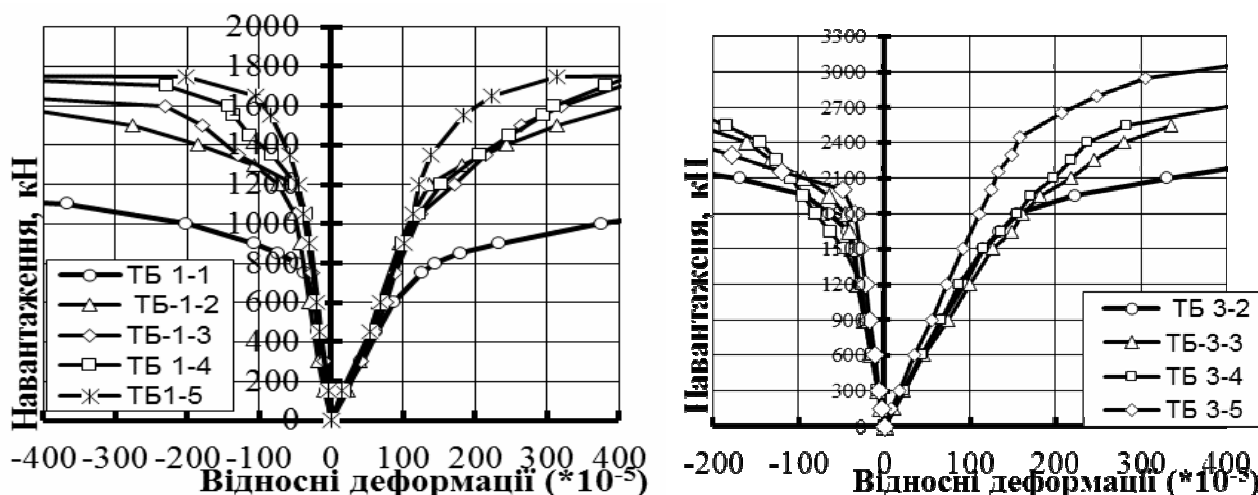


Рис. 1. Залежність поздовжніх та поперечних деформацій від навантаження зразків серії ТБ-1 та ТБ-3

Максимальні значення несучої здатності  $N_2$  на 2-30 % перевищували значення навантажень при початку плинності труби  $N_1$ . Найбільше значення  $N_1$  мав центрально-стиснутий зразок ТБ3-5:  $N_1 = 2600$  кН, найбільше значення  $N_2$  мав зразок ТБ-3-5:  $N_2 = 3200$  кН. Спостерігається збільшення несучої здатності елементів зі збільшенням міцності бетону та товщини стінки труби.

За результатами випробувань було обчислено коефіцієнт ефективності роботи бетонного осердя труботбетону  $\eta$  та коефіцієнт ефективності роботи в цілому  $m$ .

$$m = \frac{N_{mb}}{N_m + N_c},$$

де  $N_{mb}$  – несуча здатність центрально-стиснутого труботбетонного елемента;  $N_m$  – несуча здатність труби-оболонки;  $N_c$  – несуча здатність бетонного осердя.

Для оцінювання ефективності роботи бетонного ядра був використаний коефіцієнт, що визначається за такою формулою:

$$\eta = \frac{\sigma_c}{f_{cm}}.$$

При цьому

$$\sigma_c = \frac{N_{mb} - N_m}{A_c},$$

де  $f_{cm}$  – призмова міцність;  $A_c$  – площа поперечного перерізу бетонного ядра.

Значення коефіцієнта  $\eta$  наведені в таблиці. Коефіцієнт оцінювання ефективності бетонного ядра (рис. 2) коливається в межах 0,8 – 1,24 і залежить від товщини стінки та способу передачі навантаження.

Значення коефіцієнтів ефективності роботи труботбетонних елементів в цілому  $m$  наведені в таблиці. Коефіцієнт  $m$  залежить від способу передачі навантаження на труботбетонний елемент, товщини стінки труби та міцності бетону. При передачі навантаження на комплексний переріз  $m = 0,85-1,14$ , при передачі навантаження тільки на бетон цей коефіцієнт дорівнював 1,03-1,15. У зразках серій ТБ-1 та ТБ-2 зменшується значення цього коефіцієнта зі збільшенням міцності бетону (рис. 3).

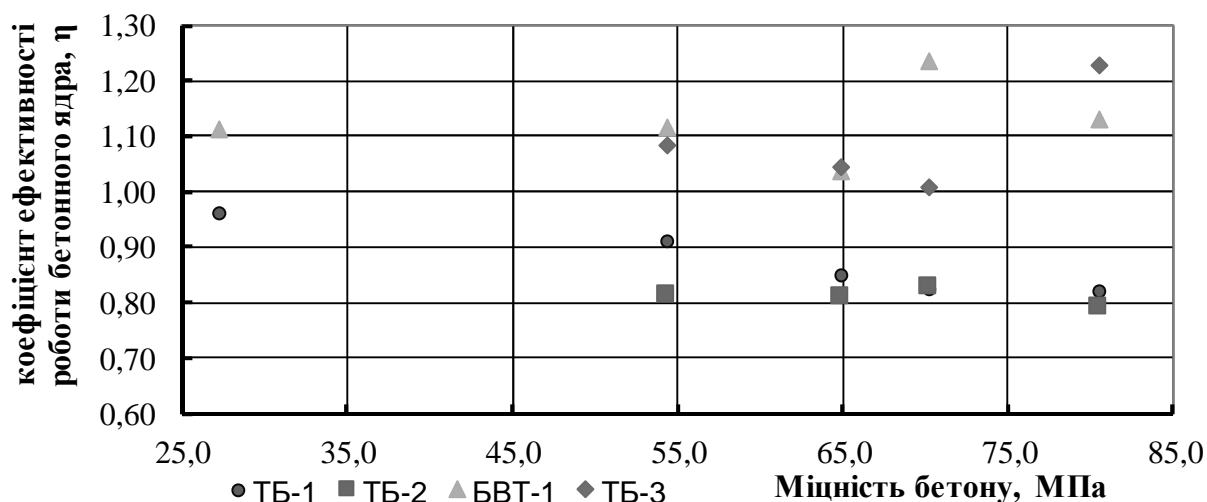


Рис. 2. Розвиток коефіцієнта ефективності роботи бетонного ядра

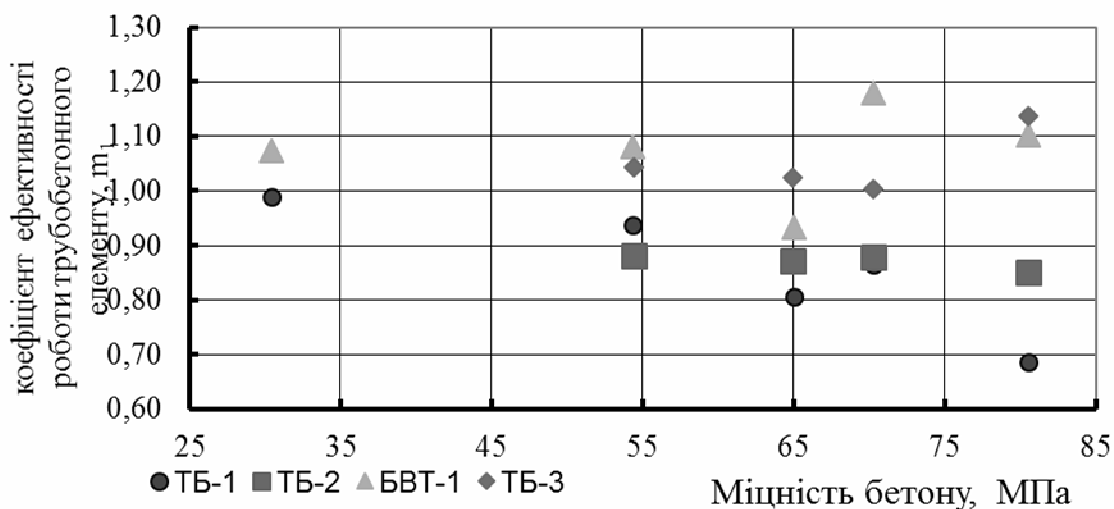


Рис. 3. Розвиток коефіцієнта ефективності роботи трубобетонного елемента

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** У результаті експериментальних досліджень були отримані експериментальні дані про несучу здатність та деформований стан центрально-стиснутих трубобетонних елементів із ядрами з високоміцного бетону та обчислено коефіцієнти ефективності застосування високоміцного бетону в трубобетонних конструкціях. За результатами випробувань центрально-

стиснутих трубобетонних елементів встановлено, що граничне зусилля  $N_2$  на 2-43 % перевищує значення  $N_1$ . Таким чином, співвідношення  $N_2/N_1$  змінювалось у межах від 1,02 до 1,43. Причому зі збільшенням міцності бетонного осердя це співвідношення зменшується. Залежно від коефіцієнта армування (товщини стінки) та міцності бетонного ядра значення коефіцієнта ефективності роботи бетонного ядра  $\eta$ , яке обчислено для зусилля  $N_1$ , коливається в межах від 0,8 до 1,24.

Максимальне значення коефіцієнта має труобетонний елемент ТБ-3-5 з товщиною стінки сталеві оболонки 6 мм та міцністю бетону 80,5 МПа. Коефіцієнт ефективності роботи труобетону  $m$  збільшується із збільшенням коефіцієнта армування, а зі

збільшенням міцності бетону коливається від 0,8 до 1,14. Найбільш ефективними виявились зразки серії ТБ-3 з товщиною стінки сталеві оболонки 6 мм та міцністю бетону 80,5 МПа.

### Список використаних джерел

1. Кебенко, В. Н. Опыт строительства сталебетонных конструкций в Германии [Текст] / В. Н. Кебенко // Проблемы теории та практики залізобетону: зб. наук. статей. – Полтава: ПДТУ ім. Ю. Кондратюка, 1997. – С. 206-209.
2. Стороженко, Л. І. Загальні відомості про труобетон [Текст] / Л. І. Стороженко // Сталезалізобетон: зб. наук. праць Полт. ДТУ ім. Ю. Кондратюка; за ред. д.т.н., проф. Л. І. Стороженка. – Полтава: ПДТУ, 2006. – С. 11-154.
3. Mechanical Properties of High Strength Concrete Filled Steel Tubular Columns [Текст]/ Ke Feng Tan, Lai Bao Liu// Advanced Materials Research Vols. 472-475 (2012) – P. 1119-1125.
4. Стороженко, Л. І. Труобетон [Текст] / Л. І. Стороженко, О. І. Лапенко, Д. А. Єрмоленко. – Полтава : ПолтНТУ, 2009. – 306 с.
5. Кикин, А. И. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном [Текст] / А. И. Кикин, Р. С. Санжаровский, В. А. Труль. – М.: Стройиздат, 1974. – 145 с.
6. Кришан, А. Л. Сталетруобетонные колонны с предварительно обжатым ядром [Текст] / А. Л. Кришан, М. Ш. Гареев, А. И. Сагадатов // Бетон и железобетон. – 2004. – №6. – С. 11-14.
7. Стороженко, Л. І. Сумісна робота компонентів в труобетонному конструктивному елементі [Текст] / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко // Теорія і практика будівництва: Вісник національного університету "Львівська політехніка". – Львів: Львівська політехніка, 2010. – Вип. 662. – С. 350-354.
8. Стороженко, Л. І. Несуча здатність коротких сталевих труб заповнених високоміцним бетоном [Текст] / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко, О. В. Демченко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 69. – С. 492-496.
9. Стороженко, Л. І. Експериментальні дослідження високоміцних бетонів для ядер труобетонних елементів [Текст] / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко, О. В. Демченко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне, 2013. – Вип. 27. – С. 222-228.

Єрмоленко Дмитро Адольфович, д-р техн. наук, професор кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Тел.: (066) 450-33-49. E-mail: yermolenko-da@ukr.net.

Демченко Оксана Володимирівна, канд. техн. наук, старший викладач кафедри технології будівельних конструкцій виробів і матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (050) 189-34-19. E-mail: homenko\_81@ukr.net.

Yermolenko Dmitry, doctor of technical science, professor department of highways, geodesy, land management and rural building, Poltava national technical Yuri Kondratyuk university. Tel.: (066) 450-33-49. E-mail: yermolenko-da@ukr.net.

Demchenko Oksana candidate of technical sciences, senior lecture, department of technology building designs, products and materials, Poltava national technical Yuri Kondratyuk university. Tel.: (050) 189-34-19. E-mail: homenko\_81@ukr.net.

Стаття прийнята 13.06.2017 р.