*Strouhal Number of cylinder pair // Acta Technica ČSAV. – 1974. – No 5. – S. 581–588. 4. Okajima, A. Flows around Two Tandem Circular Cylinders at Very High Reynolds Numbers // Bulletin of the JSME. – April 1979. – Vol. 22. – No 166. 5. Williamson C.H.K. Evolution of a single wake behind a pair of bluff bodies // Journal of Fluid Mechanics. – 1985. – Vol. 159. – S. 1–18. 6. Zdravkovich M.M. Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements // ASME Transactions, Journal of Fluids Engineering. – 1977. – Vol. 99. – P. 618–631. 7. Zdravkovich M.M. The effects of interference between circular cylinders in cross flow // Journal of Fluids and Structures 1. – 1987. – P. 239–261. 8. Графский И.Ю., Казакевич М.И. Аэтодинамика плохообтекаемых тел: Учеб. пособие. – Днепропетровск, 1983. – 116 с. 9. Wojciechowski J., Żurański J. A., Kinasz R. Badania liczby Strouhala wiązki walców kołowych // Materialy III Ogolnopolskie sympozijum "Wplywy srodowiskowe na budowle i ludzi – obciazena, oddzialywania, interakcje, dyskomfort". – Lublin, 2001. – S. 55–62. 10. Żurański J.A. Wpływ interferencji aerodynamicznej na obciążenie wiatrem stalowych kominów wieloprzeodowych // Prace Instytutu Techniki Budowlanej. – Kwartalnik, 2000. – N 2–3. – S. 37–64. 11. Кінаш Р.І. Коваленко В.А., Копилов О.Є. Аеродинамічні дослідження числа Струхаля для поодинокого цидіндра круглого перерізу // Вісн. ДДАБА. – Макіївка, 2001. – Вип. 2001–1(26). – С. 110–115. 12. Кінаш Р.І. Стасюк М.І., Копилов О.Є. Аналіз аеродинамічних досліджень колових циліндрів // Вісн. ДДАБА. – Макіївка, 2001. – Вип. 2001-1(26). – С. 113–125.*

**УДК 624.016**

**К.Ф. Клименко**
Львівський державний аграрний університет

# НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ РОЗТЯГНУТИХ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ТРУБОЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ*

*© Клименко К.Ф., 2002*

**У розтягнутих трубозалізобетонних елементах, армованих різними за класом сталями, в поєднанні високоміцної з м'якою сталлю труб (Ст-3) в процесі напруження за рахунок збільшення розрахункового опору сталі труби до і після границі текучості, а також при подальшому завантаженні за рахунок явища самозміцнення досягається збільшення міцності. Експериментальними випробовуваннями встановлено, що при використанні такого конструктивного рішення і особливостей його роботи досягається значна економія сталі в конструкції.**

## Вступ

Конструктивно трубозалізобетон у поперечному перерізі являє собою сталеву оболонку труби, заповнену бетоном або цементним розчином, який, своєю чергою, армується звичайною або попередньо напруженою стрижневою чи іншою арматурою.

Бетон або високоміцний розчин в сталевій трубі має призначення сприймати значні сили попереднього напруження, забезпечувати сумісну роботу сталевої труби із звичайною

---

* *Експериментальні дослідження виконані в 1979 році на кафедрі будівельних конструкцій Львівського політехнічного інституту*

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

чи попередньо напруженою арматурою, а також підвищувати поздовжню стійкість трубозалізобетонного елемента в цілому.

Одночасно бетон або цементний розчин є своєрідним антикорозійним захисником поздовжньої звичайної чи попередньо напруженої арматури, а також внутрішньої поверхні сталевої труби трубозалізобетонних елементів.

Якщо центрально стиснуті трубобетонні елементи, які входять в стрижневі системи, розглядаються в багатьох дослідних роботах і конструктивних рішеннях, то робота центрально розтягнутих трубозалізобетонних елементів, які є складовими елементами цих конструкцій, вивчалася одиничними дослідниками [1–4].

Вперше запропоновано конструктивне рішення трубозалізобетонних елементів, які можуть бути застосовані в стрижневих системах (кроквяних фермах, арках, рамах, структурних конструкціях тощо) і бути набагато економічно ефективнішими порівняно із трубобетонними [5].

В практиці будівництва конструкції трубозалізобетонних елементів, армованих звичайною та попередньо напруженою арматурою, ще не знайшли застосування, оскільки таке конструктивне рішення потребує експериментальної перевірки та економічного обґрунтування.

## Експериментальні дослідження

Метою досліджень передбачалося:

– експериментально дослідити несучу здатність центрально розтягнутих трубозалізобетонних елементів, армованих як звичайною, так і попередньо напруженою арматурою;

– дати оцінку росту поздовжніх і поперечних деформацій під навантаженням в сталі труби, в арматурі, бетоні;

– розробити методику розрахунку центрально розтягнутих трубозалізобетонних елементів;

– встановити і обґрунтувати характер та основні принципи руйнування центрально розтягнутих трубозалізобетонних елементів.

Для досягнення поставленої мети та з’ясування роботи трубозалізобетонних елементів під навантаженням були виконані експериментальні дослідження спеціальних зразків.

Програмою було передбачено і досліджено 5 серій 19 трубозалізобетонних зразків.

Дослідження перших 3-х серій (дванадцять зразків) описано у [5].

У цій статті подаються дослідження IV серій – восьми попередньо напружених трубозалізобетонних зразків.

Усі дослідні трубозалізобетонні зразки мали сталеві труби із зовнішнім діаметром 87 мм, товщиною 5,0 мм і довжиною 500 мм. На рис. 1 показані конструкції зразків.

Перші три серії зразки мали на кінцях труби гвинтову нарізку, необхідну для закріплення її в захваті під час випробування на розтяг. IV і V серії зразків мали іншу конструкцію захвату і гвинтова нарізка сталевої труби не виконувалася. Оскільки поперечний переріз труби був ослаблений гвинтовою нарізкою, то для однакової міцності посередині, на ділянці 150 мм вона обточувалася до товщини 2,5–3 мм.

Сталева труба заповнювалася цементним бетоном і армувалася одним стрижнем класу А-III і А-IIIв. Діаметр стрижнів – 22, 25, 28, 32 мм. У кожну із чотирьох серій зразків входили зразки з однаковим діаметром стрижнів, тобто одного відсотка армування, крім п’ятої серії, причому у кожній серії два зразки були попередньо напружені, а два – звичайні ненапружені. Як виняток V серія складалася з трьох звичайних ненапружених зразків.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Деформації в дослідних зразках на арматурі-стрижні, яка знаходиться в бетоні оболонки-труби і поза нею, а також на поверхні стінки труби і на бетоні замірялися електротензодавачами. Для виготовлення дослідних зразків трубозалізобетонних елементів застосовувалися матеріали із фізико-механічними характеристиками, наведеними у табл. 1.

Випробування дослідних зразків усіх серій виконувалися на розривних машинах потужністю 50 та 100 т. Кожний ступінь навантаження становив 60 кН, що близько до 0,1 F руйнівної сили.

Для дослідження трубозалізобетонних зразків на розтяг застосовувалася розривна машина з захватами спеціальної конструктивної розробки.

Величина попереднього напруження для зразків армованих стрижнями класу А-IIIв, становила $(0{,}37–0{,}44)R_{sn}$.

Для дослідження трубозалізобетонних зразків на розтяг застосовувалася розривна машина з захватами спеціальної конструкції.

Робота дослідних трубозалізобетонних зразків на розтяг під навантаженням може бути подана у вигляді трьох послідовних стадій.

На першій стадії дослідні зразки працюють як пружні. Цей період продовжується від початку навантаження дослідних зразки до виникнення текучості сталі у стінці труби.

Друга стадія охоплює пружно-пластичну роботу зразків і займає період від початку текучості сталі труби до початку умовної текучості сталі стрижня-арматури в бетоні труби.

Третя стадія характеризується пластичною роботою зразка, коли настає загальна текучість сталі як в стрижні-арматурі, так і як продовження пластичних деформацій сталі труби. Ця стадія приймається за граничний стан роботи трубозалізобетонного елемента при роботі на розтяг.

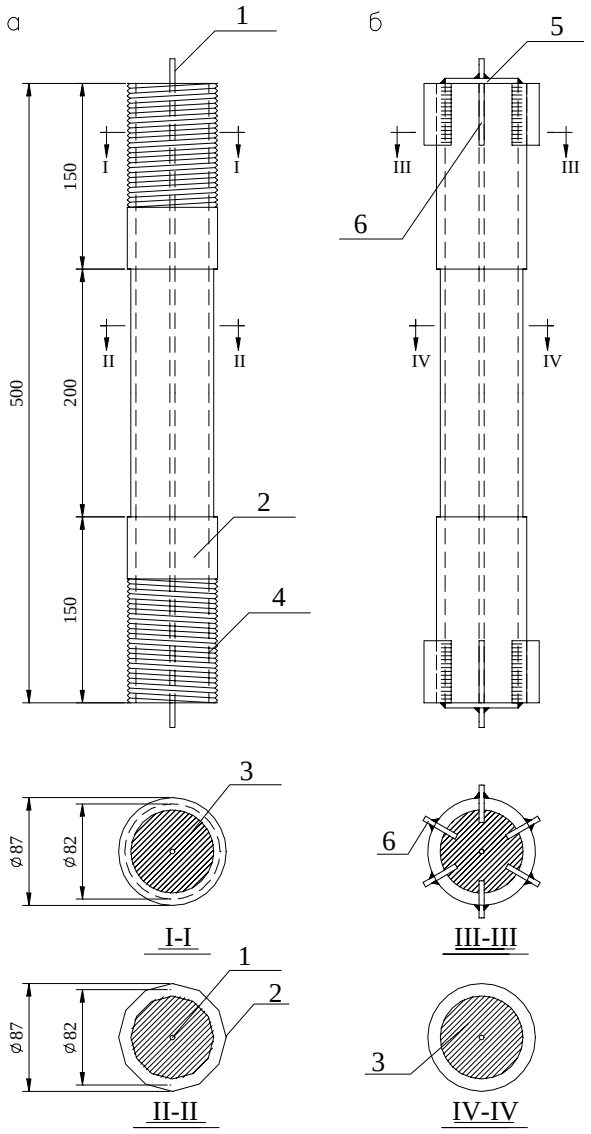


*Рис. 1. Конструкції дослідних зразків: а – зразок з гвинтовою нарізкою на кінцях сталевої труби; б – зразок з ребрами на кінцях сталевої труби: 1 – арматура; 2 – сталева труба; 3 – цементний бетон; 4 – зовнішня гвинтова нарізка на кінцях сталевої труби; 5 – сталева пластина; 6 – сталеві ребра*

За фізичний стан руйнування приймається період досягнення сталлю стрижня-арматури межі міцності, що призводить спочатку до розриву стрижня-арматури, а потім стінки сталевої труби і в цілому руйнування зразка.

Результати випробувань дослідних попередньо напружених трубозалізобетонних зразків чотирьох серії в кількості 8 подані у табл. 2.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

*Таблиця 1*

**Геометричні і механічні характеристики попередньо напружених трубозалізобетонних зразків**

| Серія зразка | № зразка | Характеристика зразка | | | | | Характеристика стрижня | | | | | Цементний бетон | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ∅ зовнішній, мм | ∅ внутрішній, мм | Площа, $см^2$ | $R_{yn}$, МПа | $R_{un}$, МПа | ∅ мм | Площа, $см^2$ | Площа по гвинтовій нарізці, $см^2$ | $R_{yn}$, МПа | $R_{un}$, МПа | Площа, $см^2$ | Міцність бетону |
| I | 1п | 87,0 | 82,0 | 6,4 | 2500 | 3820 | 28,0 | 5,76 | 3,80 | 6500 | 8925 | 45,9 | 392 |
| | 3п | 86,7 | 81,5 | 6,3 | | | | | | | | 45,6 | |
| II | 1п | 87,0 | 81,5 | 6,9 | 2500 | 3820 | 22,0 | 3,4 | 2,83 | 6600 | 8400 | 48,0 | 357 |
| | 4п | 87,0 | 81,0 | 7,9 | | | | | | | | 48,8 | |
| III | 1п | 87,0 | 81,6 | 6,8 | 2500 | 3820 | 25,0 | 4,5 | 3,14 | 6600 | 7860 | 47,3 | 289 |
| | 4п | 87,0 | 81,3 | 7,0 | | | | | | | | 47,2 | |
| IV | 1п | 87,0 | 82,0 | 6,4 | 2500 | 3820 | 32 | 7,64 | 4,52 | 6500 | 7200 | 44,5 | 305 |
| | 4п | 87,0 | 82,0 | 6,4 | | | | | | | | 44,5 | |

*Таблиця 2*

**Результати випробування попередньо напружених трубозалізобетонних зразків**

| Серія зразка | № зразка | Попереднє напруження в стрижні-арматурі, МПа | Попереднє напруження в стрижні після передачі напруження на бетон, МПа | Напружен-ня попереднього обтиску труби, МПа | Напруження попереднього обтиску бетону, МПа | Руйнувальне навантаження | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Розрахункове $N_p$, кН | Експериментальне $N_{ek}$, кН | $\frac{N_{ek}}{N_p}$ |
| I | 1п | 408,0 | 292,0 | 9,4 | 10,2 | 758,8 | 412,0 | – |
| | 3п | 416,0 | 292,0 | 10,0 | 8,2 | 754,4 | 460,0 | – |
| II | 1п | 400,0 | 399,0 | 5,80 | 5,60 | 559,1 | 394,0 | – |
| | 4п | 422,0 | 340,0 | 6,40 | 6,00 | 587,3 | 548 | 1,04 |
| III | 1п | 324,0 | 172,0 | 6,0 | 7,20 | 613,6 | 590,0 | 1,04 |
| | 4п | 304,0 | 112,0 | 4,60 | 7,40 | 622,2 | 586,0 | 1,05 |
| IV | 1п | 290,0 | 144,0 | 6,0 | 5,20 | 764,0 | 622,0 | – |
| | 4п | 246,0 | 122,6 | 8,20 | 7,20 | 793,8 | 783,0 | 0,986 |

*Примітки:* 1. Зразки серії I № 1п, № 3п, серії II № 1п, серії IV № 1п зруйнувалися внаслідок зрізу гайки по різі стрижня, і після цього розірвалася сталева труба.

2. Зразки серії II № 4п, серії III № 1п, № 4, серії IV № 4п зруйнувалися внаслідок розриву сталевої труби і стрижня одночасно.

Загальне уявлення про роботу попередньо напружених трубозалізобетонних зразків під навантаженням дає випробування зразка 4 серії IV (рис. 2).

Після передачі попереднього напруження стрижня на бетон-трубу в сталі труби виникли поздовжні стискаючі деформації, які дорівнюють – $\varepsilon = 50\times10^{-5}$, а в бетоні –

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

$\varepsilon = 30\times10^{-5}$. Величина деформацій попереднього напруження на початок навантаження в стрижні арматури зменшилась на $\varepsilon = 67\times10^{-5}$. Що стосується поперечних деформацій сталі труби, то під дією попереднього напруження в сталі труби виникли розтягуючі поперечні деформації $\varepsilon = 8\times10^{-5}$. Проте в процесі завантаження знак поперечних деформацій сталі труби змінився, вони росли пропорційно величині навантаження і при навантаженні N = 650кН стискаючі поперечні деформації становили $\varepsilon = 42\times10^{-5}$.

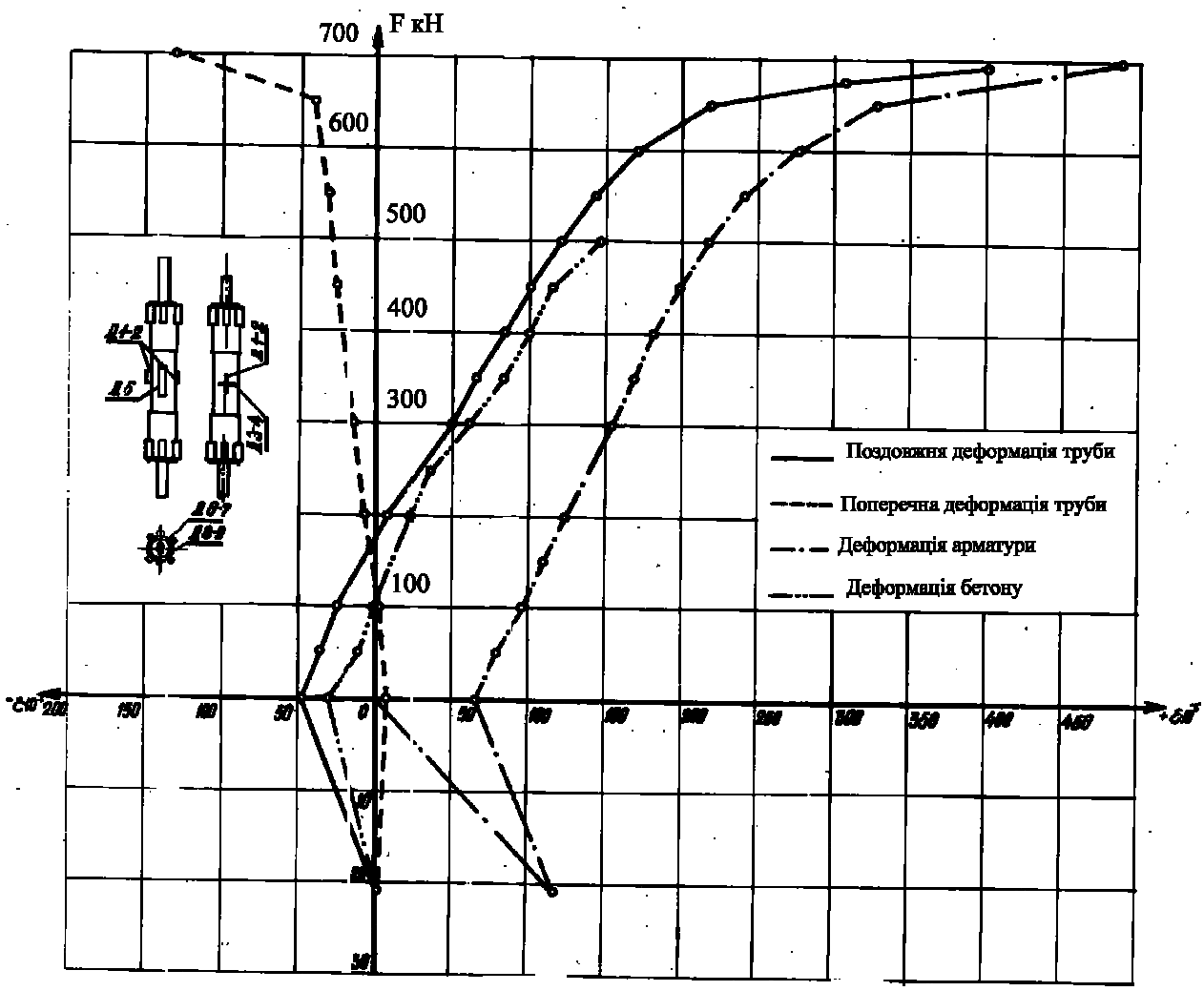


*Рис. 2. Графік зростання деформацій в попередньо напруженому зразку 4 серії IV*

Зростання поперечних деформацій сталі труби при навантаженні зразків позитивно вплинуло на збільшення деформацій розтягу бетону-розчину в обоймі труби. Так, в обоймі труби для цього зразка зафіксований підвищений розтяг деформації бетону, який при навантаженні $N_B$ = 500кН становив $\varepsilon = 150\times10^{-5}$.

Це позитивне явище, виявлене дослідженням, не впливає на величину граничного руйнувального навантаження, оскільки в цей час бетон-розчин повністю виключається із роботи. Особливість роботи бетону в обоймі труби попередньо напружених трубобетонних зразків впливає на роботу поперечного перерізу в стадії експлуатації та істотно позначається на зменшенні всіх втрат попереднього напруження. Так, для попереднього напруження дослідних зразків I, II, IV серій втрати напруження в арматурі внаслідок усадження та плинності бетону через 1,5 місяця після передачі натягу стрижня-арматури на бетон-трубу становили у вигляді

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

деформацій $\varepsilon^{П}$ = 20– –22×10$^{-5}$. Ці втрати попереднього напруження значно менші, ніж у попередньо напружених залізобетонних конструкціях.

Зменшення втрат попереднього напруження в конструкціях має істотне значення для повнішого використання властивостей міцності високоміцних сталей. У цьому випадку робота бетону в обоймі труби – один із способів зменшення втрат попереднього напруження і підвищення деформативних властивостей бетону при розтягу.

Як видно із графіка рис. 2 при навантаженні силою розтягу попередньо напруженого зразка 4 серії IV спочатку в сталі труби вибираються деформації стиску, а далі графік розтягу має вигляд прямолінійної кривої до навантаження $N_B$ = 500 кН, яке викликає деформації сталі труби, що дорівнюють $\varepsilon = 120\times10^{-5}$. Ці деформації сталі труби відповідають межі текучості сталі труби.

Що стосується сталі стрижня-арматури, то крива графіка деформацій при цьому навантаженні має також прямолінійний характер і йде паралельно з кривою сталі труби. Деформації розтягу сталі стрижня-арматури з урахуванням деформацій попереднього натягу становлять $\varepsilon = 220\times10^{-5}$.

Починаючи з навантаження $N_B$ = 550кН, зростання деформації сталі труби і стрижня значно зростають, а крива графіка деформацій наближається в проміжку навантаження 600–700 кН до пологої кривої. При цьому навантаженні $N_B$ = 670кН деформації сталі стрижня-арматури становили $\varepsilon = 400\times10^{-5}$, що відповідає напруженням σ = 840 МПа, а стрижень-арматура зразка, маючи площу поперечного перерізу $A_{ст}$ = 4,52 см$^2$, сприймає навантаження $N_{CT}$ = 379,7 кН. Навантаження, яке сприймає сталь труби зразка, становить $N_{NP}$ 670–379,9 = 290,3 кН, що відповідає напруженням $\sigma_{тр}$ = 453,6 МПа при поперечному перерізі труби $A_{TP}$ = 6,4 см$^{2.}$

Аналіз роботи попередньо напруженого трубозалізобетонного елемента, в якому одночасно сприймають навантаження різні за класом сталі, в поперечному перерізі свідчить про те, що при досягненні високоміцною сталлю межі міцності звичайна м’яка сталь труби здатна нести за рахунок зміцнення за межею текучості додаткові напруження.

Міцність трубозалізобетонного зразка визначається за рівнянням

$$N_B = kA_1\sigma_{1y} + A_2\sigma_{2y}\,, \qquad (1)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від відношення площ поперечних перерізів сталі труби і стрижня-арматури, а також відношень їх меж текучості. У цих експериментах коефіцієнт становив 1,60 – 1,78; $A_1\sigma_{1y}$ – площа перерізу і межа текучості сталі труби; $A_2\sigma_{2y}$ – площа перерізу і умовна межа текучості високоміцної сталі стрижня-арматури.

Фізичне руйнування дослідних зразків відбувається після втрати несучої здатності матеріалу труби і стрижня-арматури, при досягненні високоміцною сталлю межі міцності.

Фізичне руйнівне зусилля для трубозалізобетонних елементів визначається за формулою

$$N^{ф}_{руйн} = A_1\sigma_{1un} + A_2\sigma_{2un} \qquad (2)$$

де $A_1\sigma_{1un}$ – площа перерізу і тимчасовий опір сталі труби; $A_2\sigma_{2un}$ – площа перерізу і тимчасовий опір стрижня-арматури.

## Висновки

Застосування в стрижневих трубчастих системах розтягнутих попередньо напружених трубозалізобетонних елементів у поєднанні із стисненими трубобетонними дають можливість отримати більш досконале конструктивне рішення з кращими економічними показниками:

– оцінка несучої здатності та підбір перерізу розтягнутих звичайних та попередньо напружених трубозалізобетонних елементів пропонується за методикою, поданою у цій роботі;

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

– в розтягнутих трубозалізобетонних елементах, армованих різними за класом сталями в поєднанні з високоміцною з м'якою сталлю труби (Ст-3), завдяки підвищенню розрахункового опору сталі труби до межі текучості і надалі за рахунок явища самозміцнення можна одержати підвищення несучої здатності, тобто досягнути економії сталі;

– підвищення несучої здатності трубозалізобетонних елементів залежить від співвідношення площ поперечних перерізів, застосованих класів сталей та їх розрахункових опорів;

– зростання стискаючих попередніх деформацій сталі труби при розтягу трубозалізобетонних елементів і особливості роботи бетону в обоймі сталевої труби позитивно впливають на збільшення деформацій розтягу бетону, яка для дослідних зразків у декілька разів більша за деформації розтягу бетону у звичайних умовах;

– робота бетону в обоймі сталевої труби чинить великий вплив на зменшення величини втрат попереднього напруження в стрижні-арматури внаслідок пружного обтиску, усадження та повзучості бетону. При цьому в попередньо напружених трубозалізобетонних елементах бетон в обоймі при передачі зусилля натягу на бетон-трубу здатний сприйняти більші зусилля при менших втратах попереднього напруження порівняно із сталевими чи залізобетонними, а це значить, що поперечний переріз попереднього напружених елементів буде менший і більш економічний.

*1. Передерий Г.П. Трубчатая арматура. – М., 1945. 2. Скворцов Н.Ф. Применение сталетрубобетона в мостостроении. – М, 1955. 3. Andre U. Verbundträger mit betongefüllten. Stahlrohren. – Acier – Stahl – Steel, 1961. – 26. – S. 174. 4. Стороженко Л.И., Семко А.В., Ефименко В.И. Сталежелезобетонные конструкции. – К., 1997. – 157 с. 5. Клименко К. Несуча здатність розтягнутих трубозалізобетонних елементів із звичайною і попередньо напруженою арматурою // Вісн. Львів. державного аграрного університету. – 2001. – № 2. – С. 75–85.*

**УДК 697.327**

**М.Д. Климпуш, В.Г. Кваша*, І.В. Мельник***
Корпорація "Укравтодор"
* Національний університет "Львівська політехніка", кафедра БКМ

# ВИПРОБУВАННЯ Й ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДСИЛЕННЯ МОСТОВИХ БАЛОК ЗА ТП ВИП.56 НАКЛЕЮВАННЯМ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

*© Климпуш М.Д., Кваша В.Г., Мельник І.В., 2002*

**Подано методику і результати випробувань натурних мостових балок довжиною 14 м, підсилених синтетичними матеріалами. Показано ефективність підсилення для збільшення надійності і довговічності.**

## Формулювання завдання. Мета і завдання досліджень

Збірні залізобетонні прогонові будови, зібрані з Т-подібних балок, армованих багаторядовою зварною арматурою, масово застосовували в мостах малих і середніх прогонів з початку 50-х років після розробки ПІ "Союздорпроект" типового проекту вип. 56 (діафрагмові прогонові

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua