
БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.075.23

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ САМОНАПРУЖЕНОГО БЕТОНУ ЯК ЯДРА
ДЛЯ СТАЛЕБЕТОННИХ КОЛОН КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ**

Кандидати техн. наук Є. І. Галагурия, М. О. Ковальов, Л. Б. Кравців, Д. Г. Петренко,
асп. І. В. Биченок

**THE EFFICIENCY SELF-STRESSED CONCRETE AS THE CORE FOR SQUARE
CROSS-SECTION STEEL-CONCRETE COLUMNS**

PhD (Tech.) E. Galagurya, PhD (Tech.) M. Kovalov, PhD (Tech.) L. Kravtsiv,
PhD (Tech.) D. Petrenko, postgraduate student I. Bychenok

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.175885>

У статті розглядається ефективність використання самонапруженого бетону як ядра для сталебетонних колон квадратного поперечного перерізу. Для цього на першому етапі було проведено розрахунок сталебетонної колони розмірами $100 \times 100 \times 3$ мм, довжиною 500 мм з використанням як ядра перерізу бетону марки С16/20. На наступному етапі дослідження, виходячи з умов однакової несучої здатності колон, був підібраний поперечний переріз з використанням самонапруженого бетону. Також було проведено порівняння характеристик сталебетонних колон з використанням як ядра перерізу звичайного і самонапруженого бетону. Встановлено, що при однаковій несучій здатності вартість колони із самонапруженим бетоном менша від вартості колони зі звичайним бетоном на 20.6 %, вага колони зменшилась на 8.67 %, площа поперечного перерізу зменшилась на 36 %.

Ключові слова: самонапружений бетон, сталебетон, колона, несуча здатність.

The paper considers the efficiency of using self-stressed concrete as a core for steel-concrete columns square section.

On the first step the bearing capacity for steel-concrete column square section $100 \times 100 \times 3$ mm length 500 mm with concrete C16/20 as the core was obtained.

At the next stage we determine which cross-section is necessary to obtain the same bearing capacity when using self-stressed concrete as a core.

To determinate bearing capacity of steel-concrete columns the unified method for polygon steel-concrete columns was used. For self-stressed concrete, the prismatic strength of concrete should be replaced with the reduced prismatic strength, taking into account the compressive stresses of concrete in the process of self-stressing and volumetric compressing. The minimum required concrete self-stress ensures the concrete core and steel shell collaboration. To ensure the collaboration the Poisson ratios of the self-stress concrete and steel shell should be equal. This is necessary for optimal design of the construction which takes in account, among other parameters, the consumption of self-stress cement.

The same bearing capacity with using self-stressed concrete will be provided with cross section $80 \times 80 \times 3$ mm, length 500 mm. A verification was performed for the section $80 \times 80 \times 3$ mm. Bearing capacity for regular concrete was 440 kN and 435 kN for self-stressed concrete.

The concrete composition to produce self-stress concrete with specified characteristics was selected. Portland cement M400, river sand, crushed stone fraction 5-10, Alumina cement and gypsum were used as components for concrete mix. To obtain the Sp-1.2 self-stress grade the consumption of the self-stress cement was chosen.

As a result, the cost of a column with self-stressed concrete is less than the cost of a column with regular concrete by 20.6 %, the weight of the column decreased by 8.67 %, the cross-sectional area decreased by 36 %.

Keywords: Self-stressed concrete, steel-concrete, column, bearing capacity.

Вступ. Сталобетонні конструкції використовують у різноманітних будівлях і спорудах, зокрема як опорні конструкції (колони). У статті подано розрахунки несучої здатності сталобетонної колони з використанням самоупругеного бетону і сталобетонної колони з використанням звичайного бетону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальним та теоретичним дослідженням використання напружених бетонів як ядра сталобетонних конструкцій присвятили свої роботи: Кришан А. Л., Мельничук А. С., Шахворостов А. І., Бондаренко В. М. та інші вчені. Але не всі питання достатньо вивчені. Зокрема недостатньо вивченою є робота сталобетонних колон квадратного поперечного перерізу з ядром із самоупругеного бетону.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є

отримати рівняння для визначення несучої здатності сталобетонної колони з ядром із самоупругеного бетону. Для досягнення сформульованої мети потрібно: визначити напруження, що виникають внаслідок об'ємного обтиску бетону; визначити напруження обтиску бетону в процесі самоупругення; визначити мінімальне необхідне самоупругення для заданого перерізу; підібрати склад бетонної суміші для отримання бетону із заданими характеристиками самоупругення.

Основна частина дослідження. Визначення несучої здатності сталобетонних колон виконуємо, використовуючи уніфікований метод [1] на прикладі колони довжиною $l = 500$ мм із розмірами поперечного перерізу $100 \times 100 \times 3$ мм (рис. 1).

Несуча здатність сталобетонних колон полігонального поперечного перерізу згідно з [1] визначається за формулою:

$$N = f_{sk} \cdot A_{sk} = \left(1 + 0.5 \cdot k_e \cdot \frac{\xi}{1 + \xi} \right) \cdot (f_y \cdot A_s + f_{ck} \cdot A_c), \quad (1)$$

де f_{sk} – узагальнена міцність сталобетонних колон;

A_{sk} – площа перерізу сталобетонної колони;

k_e – приведений коефіцієнт ефективності, $k_e = k_h \cdot k_n$;

k_h – коефіцієнт ефективності пустот (у нашому випадку пустот немає, тому $k_h = 1$);

k_n – коефіцієнт полігональності, який визначається згідно з [1], $k_n = 0.33$;

f_y – межа текучості сталі, $f_y = 220$ МПа;

A_s – площа перерізу сталеві оболонки, $A_s = 11.64 \cdot 10^{-4}$ м²;

f_{ck} – призмова міцність бетону, $f_{ck} = 16$ МПа;

A_c – площа перерізу бетонного ядра, $A_c = 88.36 \cdot 10^{-4}$ м²;

ξ – коефіцієнт приведення, $\xi = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_{ck}}$,

$\xi = 1.81$.

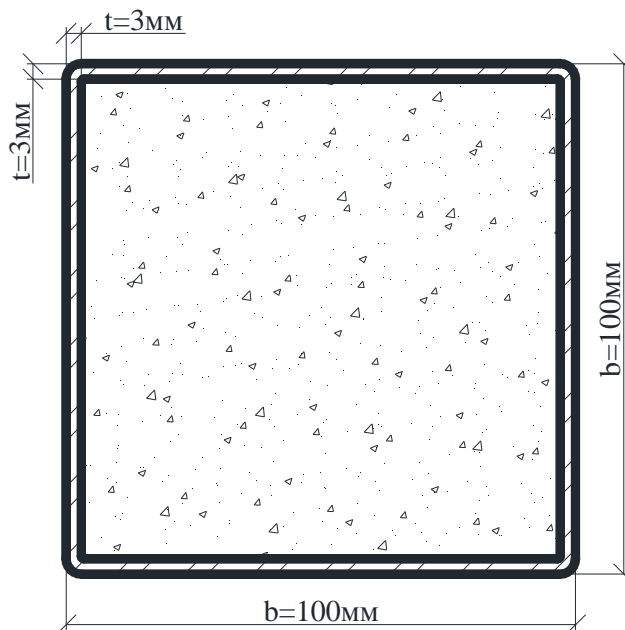


Рис. 1. Поперечний переріз колони

Виконавши розрахунки за формулою (1), отримаємо значення несучої здатності сталобетонної колони:

$$N = \left(1 + 0.5 \cdot 0.33 \cdot \frac{1.81}{1 + 1.81} \right) \cdot (220 \cdot 10^6 \cdot 11.64 \cdot 10^{-4} + 16 \cdot 10^6 \cdot 88.36 \cdot 10^{-4}) = 439.705 \text{ кН.}$$

На наступному етапі дослідження, виходячи з умов однакової несучої здатності колон, підберемо поперечний переріз із використанням самоупругеного бетону.

Для самоупругеного бетону призову міцність бетону f_{ck} необхідно

замінити на приведену призову міцність з урахуванням напружень обтиску бетону в процесі самоупругення згідно з [2] σ_{bp} і об'ємного обтиску f_{cku} , тоді формула (1) набуде вигляду:

$$N = f_{ck} \cdot A_{ck} = \left(1 + 0.5 \cdot k_e \cdot \frac{\xi}{1 + \xi} \right) \cdot (f_y \cdot A_s + f_{cku} \cdot A_c). \quad (2)$$

Напруження обтиску бетону σ_{bp} у процесі самоупругення визначається згідно з [3] за формулою:

$$\sigma_{bp} = \overline{R_{bs}} \cdot k_\mu \cdot k_s, \quad (3)$$

де k_s – коефіцієнт тривісного армування, який приймається рівним 1.5;

k_μ – коефіцієнт, який визначається залежно від сумарного коефіцієнта армування, отримуємо за формулою:

$$k_{\mu} = \sqrt{\frac{1.57 \cdot \mu}{0.0057 + \mu}}; \quad (4)$$

μ – сумарний коефіцієнт армування, який визначається за формулою:

$$\mu = \frac{A_s}{A_c}; \quad (5)$$

$\overline{R_{bs}}$ – величина самонапруження напруженого бетону для забезпечення сумісної роботи бетонного ядра і сталеві оболонки згідно з методикою [4]; сумісна робота буде забезпечена, коли коефіцієнти Пуассона бетонного ядра та сталеві оболонки стануть рівними.

Мінімально необхідна величина обтиску бетонного ядра визначається за формулою:

$$\sigma_{bp(\min)} = 10 \cdot \mu. \quad (6)$$

$$R_{bm} = f_{ck} \cdot \left[1 + \xi_p \cdot \gamma_p \cdot \left(\frac{\overline{\sigma} - 1}{2} + \sqrt{\left(\frac{\overline{\sigma} - 1}{2} \right)^2 + 10 \cdot \overline{\sigma}} \right) \right]. \quad (9)$$

Призмову міцність бетону виразимо через міцність бетону, що твердне в обмежених умовах R_{bpr} , тоді:

$$f_{cku} = R_{bpr} \cdot \left[1 + \xi_p \cdot \gamma_p \cdot \left(\frac{\overline{\sigma} - 1}{2} + \sqrt{\left(\frac{\overline{\sigma} - 1}{2} \right)^2 + 10 \cdot \overline{\sigma}} \right) \right], \quad (10)$$

де γ_p – коефіцієнт, який враховує умови роботи сталеві оболонки сталобетонної колони квадратного поперечного перерізу:

$$\gamma_p = \alpha_1 \cdot \alpha_2; \quad (11)$$

Для визначення міцності бетону, що твердіє в обмежених умовах, використовуємо методику, наведену у [2]:

$$R_{bpr} = f_{ck} + \alpha \cdot \sqrt{\Delta f \cdot \sigma_{bp}}, \quad (7)$$

де α – коефіцієнт, який залежить від складу бетонної суміші, $\alpha \approx 1$;

Δf – поправковий коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$\Delta f = \frac{0.44}{\sqrt{f_{ck}}}. \quad (8)$$

Оскільки самонапружений бетон, перебуваючи в об'ємі, набуває складного об'ємно-напруженого стану, то необхідно визначити міцність об'ємно-стиснутого бетону R_{bm} , який розраховується згідно з [5] за формулою:

α_1 – коефіцієнт, що визначає частку розтягуювальної складової від загальної деформації стінки труби-оболонки в граничному стані, $\alpha_1 = 0.84$;

α_2 – коефіцієнт, що враховує величину зміцнення холодногнутих профілів і

розрахований за формулою К. Карена і Дж. Вінтера [2] $\alpha_2 = 1.1$.

$$\gamma_p = 0.84 \cdot 1.1 = 0.924;$$

$\bar{\sigma}$ – відносна величина бокового тиску з боку сталеві оболонки на бетонне ядро в граничному стан, визначається за формулою:

$$\bar{\sigma} = \frac{3 \cdot \rho}{6.67 + \rho}, \quad (12)$$

де ρ – конструктивний коефіцієнт трубобетону, який визначається за формулою:

$$\rho = \frac{f_y \cdot A_s}{R_{bpr} \cdot A_{sk}}, \quad (13)$$

де ξ_p – коефіцієнт, що враховує неоднорідність розподілу головних напружень за нормальним перерізом ядра, який визначається за формулою:

$$\xi_p = \left(1 - 0.01 \cdot \frac{b}{t}\right)^2. \quad (14)$$

Підставивши всі значення в рівняння (2), отримаємо графік залежності ширини оболонки від товщини стінки (рис. 2) для несучої здатності 440 кН з забезпеченням мінімального самонапруження.

Виходячи з умов однакової несучої здатності і з забезпеченням мінімального самонапруження вибираємо переріз 80×80×3 мм згідно з [6].

Виконуємо перевірку та визначаємо самонапруження, яке необхідне для забезпечення заданої несучої здатності за формулою (2), враховуючи характеристики підбраного поперечного перерізу ($A_s = 9.24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $A_c = 54.76 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $\xi = 0.968$).

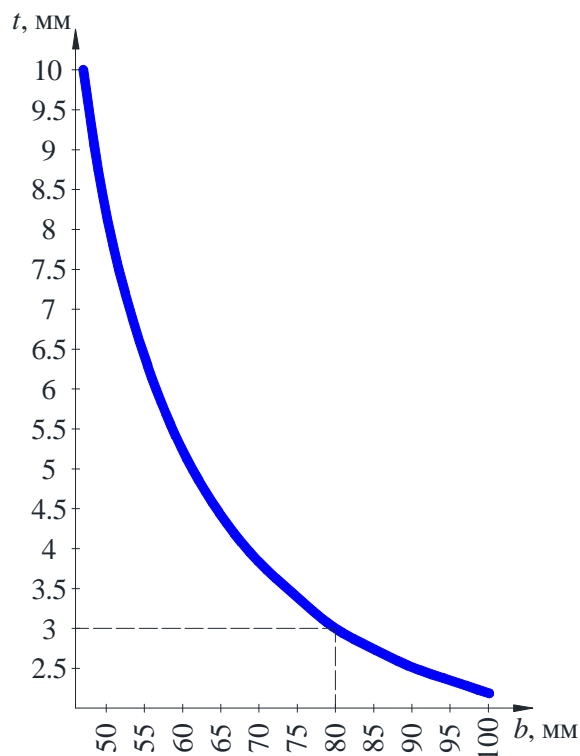


Рис. 2. Графік залежності ширини оболонки від товщини стінки

Використовуючи формулу (6), визначаємо мінімально необхідну величину обтиску бетонного ядра, для цього необхідно розрахувати коефіцієнт армування за формулою (5).

$$\mu = \frac{9.24 \cdot 10^{-4}}{54.76 \cdot 10^{-4}} = 0.16;$$

$$\sigma_{bp(\min)} = 10 \cdot 0.16 = 1.6 \text{ МПа.}$$

Визначаємо необхідну величину самонапруження з рівняння (3), де коефіцієнт, який визначається залежно від сумарного коефіцієнта армування, розраховується за формулою (4):

$$k_\mu = \sqrt{\frac{1.57 \cdot 0.16}{0.0057 + 0.16}} = 1.23;$$

$$\bar{R}_{bs} = \frac{1.6}{1.23 \cdot 1.5} = 0.86 \text{ МПа.}$$

$\overline{R_{bs}} = 0.86$ МПа, що згідно з [2] відповідає марці за самонапруженням Sp1.2 з величиною самонапруження $\overline{R_{bs}} = 0.96$ МПа. Тоді величина обтиску бетону:

$$\sigma_{bp} = 0.96 \cdot 1.23 \cdot 1.5 = 1.77 \text{ МПа.}$$

Для визначення міцності бетону, що твердіє в обмежених умовах, скористаємося формулами (7) і (8):

$$\Delta f = \frac{0.44}{\sqrt{16}} = 0.11;$$

$$R_{bpn} = 16 + 1 \cdot \sqrt{0.11 \cdot 1.77} = 16.44 \text{ МПа.}$$

Для визначення міцності об'ємно-стиснутого бетону використаємо формулу (10), де невідомі знайдемо з формул (11–14):

$$\rho = \frac{220 \cdot 10^6 \cdot 9.24 \cdot 10^{-4}}{16.44 \cdot 10^6 \cdot 64 \cdot 10^{-4}} = 1.93;$$

$$\overline{\sigma} = \frac{3 \cdot 1.93}{6.67 + 1.93} = 0.67;$$

$$\xi_p = \left(1 - 0.01 \cdot \frac{0.08}{0.003} \right)^2 = 0.54;$$

$$f_{cku} = 16.44 \cdot \left[1 + 0.54 \cdot 0.924 \cdot \left(\frac{0.67 - 1}{2} + \sqrt{\left(\frac{0.67 - 1}{2} \right)^2 + 10 \cdot 0.67} \right) \right] = 36.36 \text{ МПа.}$$

Тоді несуча здатність сталобетонної колони квадратного поперечного перерізу з

ядром із самонапруженого бетону марки Sp1.2:

$$N = \left(1 + 0.5 \cdot 0.33 \cdot \frac{0.968}{1 + 0.968} \right) \cdot (220 \cdot 10^6 \cdot 9.24 \cdot 10^{-4} + 36.36 \cdot 10^6 \cdot 54.76 \cdot 10^{-4}) = 435.044 \text{ кН}$$

Для отримання самонапруженого бетону марки Sp1.2, згідно з рекомендаціями [7], визначимо необхідну кількість напруженого цементу (НЦ) за формулою:

$$Ц = 550 \cdot \left(\frac{\overline{R_{bsn}}}{R_{cp}} \right)^2 + 450, \quad (15)$$

де $\overline{R_{bsn}}$ – нормативне самонапруження бетону, що дорівнює його проектній марці

за самонапруженням, з помноженням на поправковий коефіцієнт 1.2;

R_{cp} – активність НЦ за самонапруженням, отримана при випробуванні згідно з [8], $R_{cp} = 4$ МПа.

Необхідна кількість води для замішування визначається орієнтовно залежно від кількості цементу за формулою:

$$B = 0.18 \cdot Ц + 135. \quad (16)$$

Решта компонентів бетонної суміші визначається відповідно до [9]. Для отримання 1 м³ самоупругеного бетону марки Sp1.2 необхідно: води – 224 л, НЦ – 496 кг, піску річкового – 1042 кг, щебеню фракції 5-10 – 1933 кг.

Витрата матеріалів для отримання НЦ згідно з [8]: портландцемент М400 – 83 %, глиноземистий цемент ГЦ-40 – 10 %, гіпс будівельний – 7 %.

Порівняння вартості і характеристик сталобетонних колон подано в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння сталобетонних колон

Найменування	Сталобетонна колона з ядром зі звичайного бетону 100×100×3 мм, l=0.5 м	Сталобетонна колона з ядром із самоупругеного бетону 80×80×3 мм, l=0.5 м	Δ, %
Несуча здатність, кН	440	435	1,14
Вартість бетону, грн*	8.07	10.66	32.09
Вартість оболонки, грн*	130.8	99.60	23.85
Вартість колони усього, грн	138.87	110.26	20.6
Вага колони, кг	14.99	13.69	8.67
Площа колони м ²	1·10 ⁻²	0.64·10 ⁻²	36

* Ціни взято з мережі інтернет станом на 25.03.2019 р.

Висновки. У статті наведено результати розрахунку несучої здатності колон при використанні самоупругеного та звичайного бетону. Колона із самоупругеним бетоном розраховувалася так, щоб її несуча здатність була еквівалентна колоні зі звичайним бетоном. Для цього в роботі побудовано графік

залежності ширини оболонки від товщини стінки із забезпеченням мінімального самоупругення і заданої несучої здатності. Також було проведено порівняння вартості та характеристик сталобетонних колон зі звичайного бетону та самоупругеного.

Список використаних джерел

1. Min Yu, Xiaoxiong Zha, Jianqiao Ye. A unified formulation for circle and polygon concrete filled steel tube columns under axial compression. *Engineering Structures*. 2013. № 49. P. 1–10.
2. Кришан А. Л. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром: дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Магнитогорск. 2011. 335 с.
3. Посібник до СНиП 2.03.01-84. Посібник з проектування самоупругених залізобетонних конструкцій (до СНиП 2.03.01-84). [Чинний від 1985-05-08]. Москва, 1986. 49 с. (Інформація та документація).
4. Шахворостов А. И. Исследование напряжённо-деформированного состояния трубобетона на напрягающем цементе: дисс... канд. техн. наук: 05.23.01. Москва. 2000. 159 с.
5. Мельничук А. С. Прочность коротких трубобетонных колонн квадратного поперечного сечения: дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Магнитогорск. 2014. 191 с.
6. ГОСТ 8639-82 Трубы стальные квадратные. Сортамент. [Чинний від 1983-01-01]. Москва, 1982. 7 с. (Інформація та документація).
7. Рекомендации по применению бетонов на напрягающем цементе в монолитном и сборно-монолитном строительстве / НИИЖБ Москва. 1987. 17 с.

8. Савеня Д. Н., Соловьев Д. А., Плосконосов В. Н. Особенности прочностных и деформационных характеристик напрягающего цемента, модифицированного добавкой нитрата кальция. *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2009. № 6. С. 53–56.

9. ДСТУ Б В.2.7-215:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. [Чинний від 2010-09-01]. Київ. 2010. 18 с. (Інформація та документація).

Галагурия Євгеній Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (067)9384346. E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com.

Ковальов Максим Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (050)633-50-81. E-mail: maks_kov@ukr.net.

Кравців Лариса Богданівна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (050)160-62-24. E-mail: Laura_Kravtsiv@ukr.net.

Петренко Дмитро Григорович, канд. техн. наук, асистент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (099)467-58-46. E-mail: petrenko_dmytro@ukr.net.

Биченок Ігор Володимирович, аспірант кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (063)706-07-22. E-mail: igorbuchenok2111@gmail.com.

Galagurya Evgeniy, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (067)9384346. E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com.

Kovalov Maksym, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (050)633-50-81. E-mail: maks_kov@ukr.net.

Kravtsiv Larysa, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (050)160-62-24. E-mail: Laura_Kravtsiv@ukr.net.

Petrenko Dmytro, PhD (Tech.), Assistant lecturer, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (099)467-58-46. E-mail: petrenko_dmytro@ukr.net.

Bychenok Ihor, Postgraduate Student, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (063)706-07-22. E-mail: igorbuchenok2111@gmail.com.

Статтю прийнято 13.03.2019 р.