

*М.М. Семерак, д-р техн. наук, професор, А.М. Домінік, А.В. Субота, В.М. Байтала  
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

## ТЕРМОМІЦНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА УМОВ ПОЖЕЖІ

Розглядається напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій за умов збільшення температури конструкції на значну величину. Запропонована методика визначення та дослідження деформацій і напружень в залізобетонних конструкціях циліндричної форми за умов зміни температури. Розглянуто випадки вільного і жорсткого защемлення бокової поверхні циліндричної конструкції. Проведено дослідження величини температурних напружень від фізико-механічних характеристик металу і бетону. Результати досліджень зображені графічно.

**Ключові слова:** термоміцність, залізобетонні конструкції, пожежа, деформації.

**Постановка проблеми.** Переважна більшість залізобетонних конструкцій сучасної будівельної промисловості, складається з неоднорідних елементів і мають складну конфігурацію. Технологічні процеси їх виготовлення та умови експлуатації часто здійснюються при значних температурних змінах. Теплофізичні і механічні параметри металу і бетону залежать від температури і значною мірою впливають на їх надійність під час експлуатації. При будівництві масивних залізобетонних споруд (градирні, резервуари, промислові цехи, сховища та ін.) часто виникають тріщини ще до початку експлуатації. Причиною утворення тріщин є температурні деформації і напруження [1]. Ці деформації є неминучими в масивних бетонних конструкціях, які розігріваються в молодому віці бетону від екзотерії, а потім остивають із плином часу. Температурні деформації властиві також спорудам, які знаходяться на відкритому повітрі і зазнають атмосферних впливів, які мають періодичний характер. Аналогічний вплив чинять на конструкції технологічні цикли, наприклад в автоклавах, пропарювальних, камерах, гарячих цехах тощо [2].

Особливо небезпечними є температурні деформації і температурні напруження в залізобетонних конструкціях за умов пожежі, оскільки тоді конструкції зазнають впливу температури до 1000 °С.

Виникнення температурних деформацій при обмеженні переміщення конструкції або у зв'язку із нерівномірним їх розподілом по всьому об'ємі бетону спричиняє розвиток температурних напружень, які часто є причиною появи тріщин. У вказаному випадку температурні деформації бетону мають дві складові: вільної температурної деформації, яка пропорційна зміні температури, і так званої напруженої деформації, яка виникає внаслідок дії температурних напружень.

Для розрахунку температурних напружень і деформацій бетону необхідно знати величину вільних температурних деформацій. Величина цих деформацій характеризується коефіцієнтом лінійного температурного розширення  $\alpha_t$ , який дорівнює вільній відносній деформації матеріалу при рівномірній зміні його температури на один градус.

Тому на практиці при конструюванні і експлуатації залізобетонних конструкцій необхідно більш точно враховувати температурні поля, деформації і напруження у складних вузлах, що піддаються температурним впливам. В той же час розвиток сучасної техніки і будівництва супроводжується розширенням діапазону і підвищенням максимальних технологічних температур, ускладненням конструкторських і технологічних процесів їх виготовлення, розширенням кола вживаних матеріалів.

При теоретичних і експериментальних дослідженнях напружено-деформованого стану визначають наявні в елементах конструкцій напруження і деформації залежно від величини інтервалу і швидкості зміни температури, величини температурного градієнта, конструктивних форм і геометричних розмірів. Якщо їх величина не перебільшує відповідних допустимих критеріїв, то міцність конструкції забезпечена.

Температурні напруження, які виникають в конструкціях можна вивчати незалежно від механічних напружень, оскільки внаслідок лінійності рівнянь термопружності повні величини напружень одержимо шляхом додавання температурних і механічних напружень. Для неоднорідних елементів, які в процесі виготовлення неодноразово нагрівались, необхідно ще враховувати вплив попередніх технологічних процесів.

В роботі на основі запропонованої методики визначення та дослідження температурних напружень і деформацій в кусково-однорідних конструкціях [3], досліджено напружено-деформований стан залізобетонної циліндричної колони. Одержано аналітичні залежності напружень і переміщень від розмірів колони, механічних і теплофізичних параметрів металу і бетону. Це дає можливість розробити рекомендації для вибору такої пари метал-бетон, щоб напруження конструкції були мінімальними.

Розглянуто залізобетонну коаксіальну колону радіусом  $R_2$  в центрі якої знаходиться арматура радіусом  $R_1$ . Для аналітичних досліджень вибрано циліндричну систему координат  $r, \varphi$  і  $z$ . Вісь  $z$  сумістимо з коаксіальною віссю циліндрів. Розглянуто випадок, коли температурне поле колони симетричне до осі циліндра і постійне по всій довжині. Визначено і досліджено напружено-деформований стан колони залежно від температури.

Радіальне переміщення  $u_i$  знаходимо із розв'язку диференціального рівняння [4]

$$\frac{d^2 u_i}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_i}{dr} - \frac{u_i}{r^2} = \frac{1 + \nu_i}{1 - \nu_i} \alpha_t^{(i)} \frac{dt(r)}{dr}, \quad (1)$$

де  $u_i$  – переміщення  $i$ -го шару вздовж радіуса  $r$ , м;  $t(r)$  – температурне поле колони,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_t^{(i)}$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення,  $\text{K}^{-1}$ ;  $\nu_i$  – коефіцієнт Пуассона,  $i = 1, 2$ . Величини, які відносяться до центрального циліндра будемо позначати індексом 1, а величини, які відносяться до зовнішнього циліндра – індексом 2.

Проінтегрувавши рівняння (1) двічі по  $r$ , знайдемо його загальний розв'язок:

$$u_i = \frac{1 + \nu_i}{r(1 - \nu_i)} \int_{R_i}^r \alpha_t^{(i)} T(r) \cdot r dr + A_i r + \frac{B_i}{r}, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

де  $A_i$  і  $B_i$  – сталі інтегрування, які знаходяться з граничних умов закріплення поверхні  $r = R_2$ .

При зміні температури в залізобетонному циліндрі з арматурою виникнуть температурні напруження, які знаходимо за формулами [4].

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)} &= -\frac{\alpha_t^{(i)} \cdot E_i}{1 - \nu_i} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_{R_i}^r t \cdot r dr + \frac{E_i}{1 + \nu_i} \cdot \left[ \frac{A_i}{1 - 2\nu_i} - \frac{B_i}{r^2} \right], \\ \sigma_\varphi^{(i)} &= \frac{\alpha_t^{(i)} \cdot E_i}{1 - \nu_i} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_{R_i}^r t \cdot r dr + \frac{E_i}{1 + \nu_i} \cdot \left[ \frac{A_i}{1 - 2\nu_i} + \frac{B_i}{r^2} \right] - \frac{\alpha_t^{(i)} \cdot E_i \cdot t}{1 - \nu_i}, \\ \sigma_z^{(i)} &= \varepsilon_{zi} \frac{E_i(1 - \nu_i)}{(1 + \nu_i)(1 - 2\nu_i)} + A_i \frac{2E_i\nu_i}{(1 + \nu_i)(1 - 2\nu_i)} - \frac{E_i\alpha_t^{(i)}t(r)}{(1 - \nu_i)}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\sigma_r^{(i)}, \sigma_\varphi^{(i)}, \sigma_z^{(i)}$  – радіальні, кільцеві та осьові температурні напруження, Па;  $E_{(i)}$  – модуль Юнга, Па;  $\alpha_t^{(i)}$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення для заданих матеріалів;  $\varepsilon_z^{(i)}$  – відносне осьове видовження;  $i = 1, 2$ .

Розглянемо два випадки граничних умов на поверхні бетонного циліндра  $r = R_2$ .

Варіант 1. За умов відсутності зовнішнього защемлення циліндра сталі інтегрування  $A_i$  і  $B_i$  знайдемо з рівності переміщень  $u_i$  і радіальних напружень  $\sigma_r^{(i)}$  на поверхні контакту металу і бетону  $r = R_1$ , а також з рівності нулю переміщень при  $r = 0$  і радіальних напружень при  $r = R_2$ .

$$\begin{aligned} u_1 = u_2, \quad \sigma_r^{(1)} = \sigma_r^{(2)}, \quad \text{при } r = R_1, \\ u_1 = 0 \text{ при } r = 0, \quad u_2 = 0 \text{ при } r = R_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Відносні видовження  $\varepsilon_z^{(i)}$  в напрямку паралельному до осі циліндра знаходимо з рівнянь [4]:

$$\int_{R_2}^{R_1} \sigma_z^{(1)} \cdot r \cdot dr + \int_{R_1}^{R_2} \sigma_z^{(2)} \cdot r \cdot dr = 0, \quad \varepsilon_z^{(1)} + \frac{\sigma_z^{(1)}}{E_1} = \varepsilon_z^{(2)} + \frac{\sigma_z^{(2)}}{E_2} \quad (5)$$

Розглянуто випадок, коли температура змінилася на деяку постійну величину  $t = t_1 = const$ . Підставивши вирази (2) і (3) в умови (4) та (5) одержано систему з шести алгебраїчних рівнянь, для знаходження шести невідомих  $A_i, B_i, \varepsilon_z^{(i)}$ ,  $i = 1, 2$ .

Розв'язок системи здійснювався застосуванням методу Крамера в системі Mathcad [5]. Для конкретних значень геометричних розмірів та фізико-механічних характеристик розглядуваного коаксіального циліндра обчислювали елементи матриці, які є коефіцієнтами при змінних  $A_i, B_i, \varepsilon_z^{(i)}$ . Підставивши знайдені величини у вираз (3) визначаємо температурні напруження  $\sigma_r^{(i)}, \sigma_\varphi^{(i)}, \sigma_z^{(i)}$ .

Варіант 2. За наявності зовнішнього защемлення конструкції при  $r = R_2$  сталі інтегрування знайдемо з умов (4) і (5) в яких замінімо останню умову в (4) на умову

$$\sigma_r^{(2)} = 0 \text{ при } r = R_2. \quad (6)$$

Знаходження невідомих констант, що входять в систему рівнянь (3) здійснюється також з використанням методу Крамера.

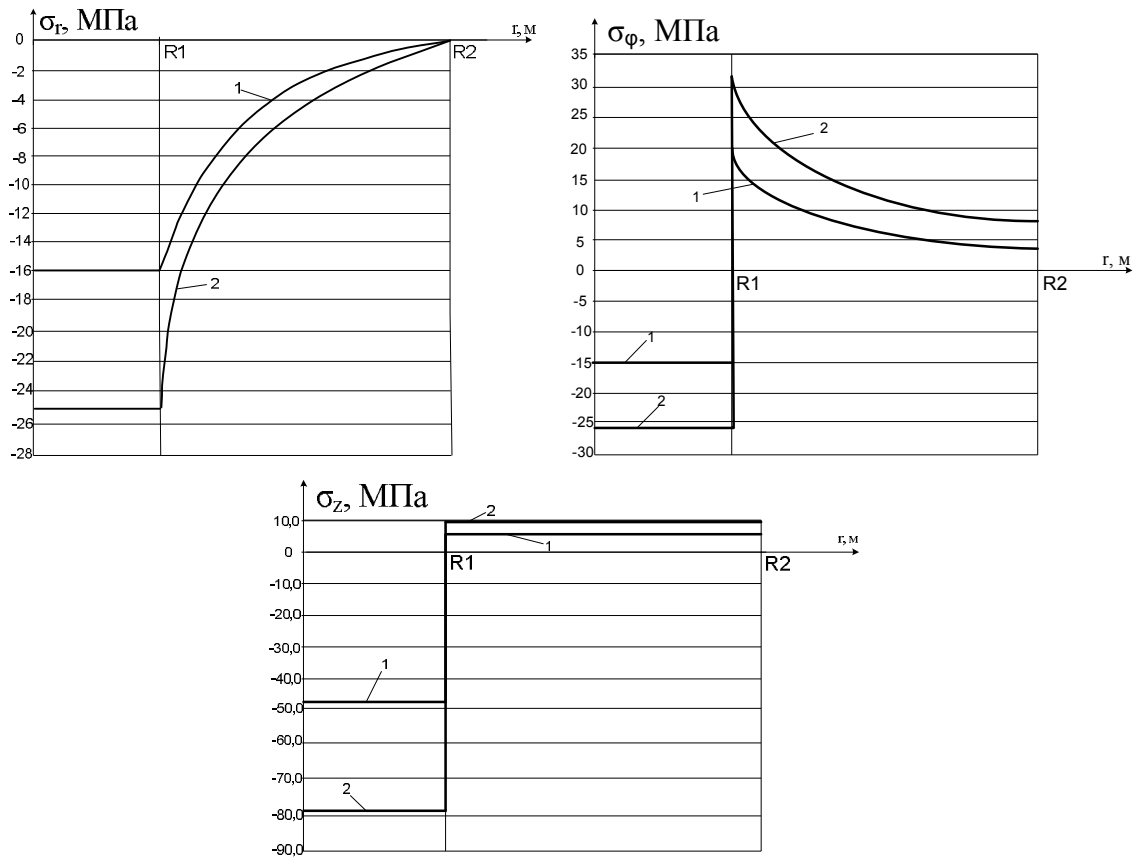
За одержаними залежностями (3) проведено дослідження температурних напружень для варіантів 1 і 2.

При цьому радіуси циліндрів дорівнюють  $R_2 = 0,06 \text{ м}$ ,  $R_1 = 0,02 \text{ м}$ .

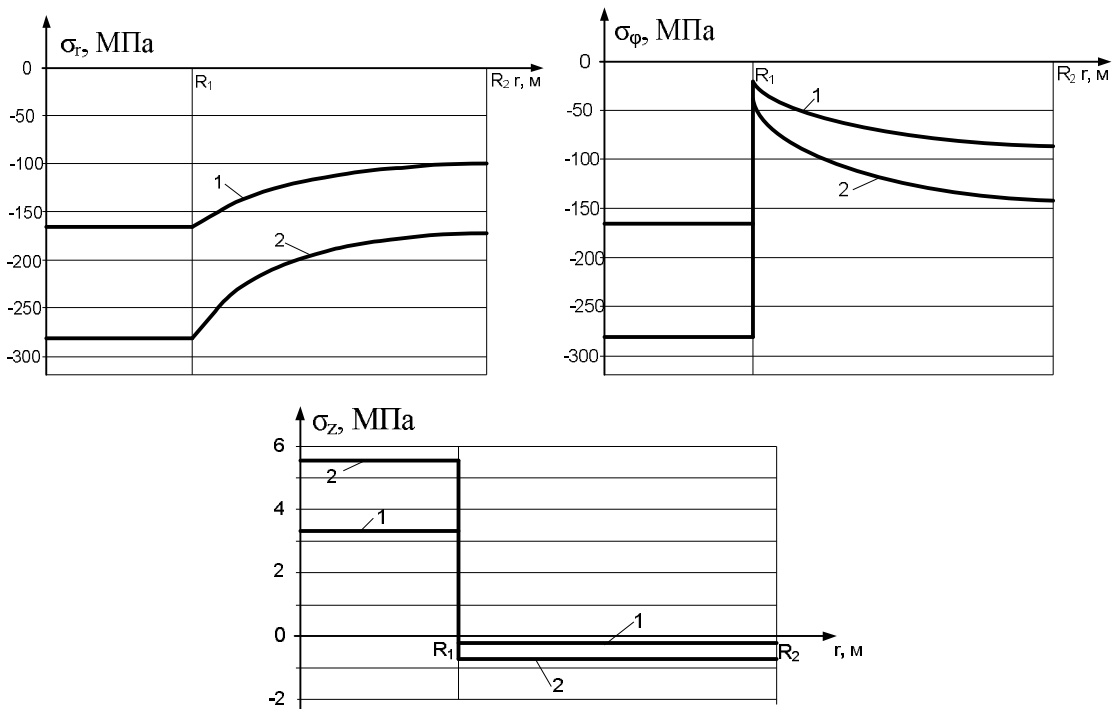
Фізико-механічні характеристики матеріалів вважалися такими:

$$\begin{aligned} E_1 = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \quad \nu_1 = 0,3, \quad \alpha_t^{(1)} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}, \\ E_2 = 0,23 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \quad \nu_2 = 0,17, \quad \alpha_t^{(2)} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}. \end{aligned}$$

Результати розрахунків представлені на рис. 1 і 2:



**Рис. 1.** Зміна величини температурних напружень вздовж радіуса бетонного циліндра з арматурою, поверхня ( $r = R_2$ ) якого вільна від навантажень



**Рис. 2.** Зміна величини температурних напружень вздовж радіуса бетонного циліндра з арматурою, поверхня ( $r = R_2$ ) якого жорстко зацемлена

На рис. 1 і 2 лінії 1 показують зміну температурних напружень при нагріванні конструкції на  $300^{\circ}\text{C}$ , а лінії 2 – на  $500^{\circ}\text{C}$ .

Аналіз графічних залежностей показує, що збільшення температури призводить до виникнення температурних напружень стиску максимальна величина яких дорівнює 25 МПа для радіальних і кільцевих температурних напружень.

Аналіз рис. 2 показує, що для защемленої поверхні  $r = R_2$ , стискаючі температурні напруження дорівнюють 282 МПа.

Аналіз графічних залежностей на рис. 1 і 2 показує, що величина температурних напружень залежить від умов защемлення зовнішньої поверхні аксіального циліндра при  $r = R_2$ .

#### **Висновки:**

Аналіз температурних напружень показує, що їх величина залежить від умов защемлення зовнішньої поверхні.

Враховуючи результати досліджень роботи [5], в якій показано залежність величини температурних напружень від фізико-механічних параметрів бетону і металу можна підібрати оптимальні параметри бетон-метал при яких будуть виникати мінімальні температурні напруження для конкретної залізобетонної конструкції.

#### **Список літератури:**

**Александровский С.В.** Расчёт бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учётом ползучести / Александровский С.В. – М.: Стройиздат, 1973. – 432 с.

**Термомеханика:** Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы за 1965-1976 гг. / Ю.М. Коляно, М.М. Семерак, О.Я. Яворская. – Львов: изд-во Львовская научная библиотека им. В. Стефаника АН УССР, 1979. – Ч. I, II. – Кн. I. – 360 с. – Кн. II. – 477 с.

**Термомеханика:** Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы за 1977-1981 гг. В трех книгах / О.Я. Яворская, Ю.М. Коляно, М.М. Семерак. – Львов: изд-во Львовская научная библиотека им. В. Стефаника АН УССР, 1986. – Кн. I – 354 с., Кн. II. – 364 с., Кн. III. – 397 с.

**Тимошенко С.П.** Теория упругости. / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер / – М.: Наука, 1975. – 576 с.

**Семерак М.М.** “Вплив фізико-механічних параметрів на термоміцність кусково-однорідних конструкцій” / М.М. Семерак, А.М. Домінік / Збірник наук. праць “Пожежна безпека” №15, ЛДУБЖД, УкрНДІПБ, 2009 р. – с. 12-15.

*М.М. Семерак, А.М. Домінік, А.В. Субота, В.М. Байтала*

### **ТЕРМОПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПОЖАРЕ**

Рассматривается напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций при значительном увеличении температуры конструкции. Предложена методика определения и исследования деформаций и напряжений в железобетонных конструкциях цилиндрической формы в условиях изменения температуры. Рассмотрены случаи свободного и жесткого защемления боковой поверхности цилиндрической конструкции. Проведено исследование величины температурных напряжений от физико-механических характеристик металла и бетона. Результаты исследований изображены графически.

**Ключевые слова:** термочность, железобетонные конструкции, пожар, деформации.

## **THERMOSTABILITY OF CONCRETE STRUCTURES UNDER FIRE**

The article considers the stress-strain state of reinforced concrete structures of considerable size under conditions of increased temperature. The methodology of detection and investigation of deformations and tension in reinforced cylindrical structures under temperature change is offered. The cases of free and hard pinching of lateral surface of the cylindrical structure are considered. A study of the value of temperature stress on physical and mechanical properties of metal and concrete was undertaken. The research results are depicted graphically.

**Key words:** thermostability, concrete construction, fire, deformation.

