

12. Tanaka Ke. *Structural phase transitions in chalcogenide glasses.* – *Phys. Rev. B.* – 1989. – Vol. 39, No 2. – P. 1270-1279.
13. Boolchand P., Georgiev D.G. and Micolaut M. *Nature of glass transition in chalcogenides.* – *J. Optoelectron. Adv. Mater.* – 2002. – Vol. 4, No 4. – P. 823-836.
14. Уханов В.И. *Оптические свойства полупроводников.* – Москва: Наука. – 1977. – 253 с.
15. Shpotyuk O.I., Kovalsky A.P., Vakiv M.M., Mrooz O.Ya. *Reversible radiation effects in vitreous As₂S₃. 1. Changes of physical properties.* – *Phys. Stat. Sol. A.* – 1994. – Vol. 144. – P. 277-281.
16. Shpotyuk O.I. and Matkovskii A.O. *Radiation-stimulated processes in arsenic trisulphide.* – *J. Non-Cryst. Solids.* – 1994. – Vol. 176. – P. 45-50.
17. Golovchak R., Shpotyuk O., 2005. *Radiation-induced bond switching in mixed Ge-As sulphide glasses.* – *Philosophical Magazine.* – 2006. – Vol. 85, No 25. – P. 2847-2860.
18. De Bast J., Gilard P. *Variation of the viscosity of glass and relaxation of stresses during stabilization.* – *Phys. Chem. Glasses.* – 1963. – Vol. 4, No 4. – P. 117-128.
19. Emelianova E.V., Hertogen P., Arkhipov V.I., Adriaenssens G.I. *A model of photoinduced anisotropy in chalcogenide glasses.* – *J. Non-Cryst. Solids.* – 2000. – Vol. 266-269. – P. 954-958.
20. Гусаров А.И., Дмитрюк А.В., Кононов А.Н., Машков А.А. *Долговременная кинетика активационных спектров пострадиационной релаксации в стеклах.* – *Ж. Эксп. Теор. Физ.* – 1990. – Т. 97. – С. 525-540.
21. Griscom D.L., Gingerich M.E., Friebele E.J. *Radiation-induced defects in glasses: origin of power-law dependence of concentration on dose.* – *Phys. Rev. Letters.* – 1993. – Vol. 71, No 7. – P. 1019-1021.
22. Shpotyuk O.I., Matkovskii A.O., Kovalsky A.P., Vakiv M.M. *Radiation-induced changes of amorphous As₂S₃ physical properties. Radiation Effects and Defects in Solids.* – 1995. – Vol. 133, No 1. – P. 1-4.

УДК 539.377

М.І.Бужанський (Управління будівельно-монтажних робіт Укргазспецбудмонтаж)

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ОБУМОВЛЕНОГО ЗМІНОЮ ТЕМПЕРАТУРИ

Запропонована методика визначення та дослідження деформацій і напружень в залізобетонних конструкціях циліндричної форми при зміні температури. Результати числових досліджень зображені графічно.

Актуальність теми. Переважна більшість конструкцій сучасної будівельної промисловості виготовляється із залізобетону і має складну конфігурацію. Технологічні процеси їх виготовлення та експлуатація часто здійснюються при значних температурних змінах. Теплофізичні і механічні параметри металу і бетону відрізняються за величиною і значною мірою впливають на їх міцність, надійність і ефективність виробництва. При будівництві масивних залізобетонних споруд (градирні, резервуари, промислові цехи, сховища та ін.) часто виникають тріщини ще до початку експлуатації [1,2]. Причиною утворення тріщин є температурні деформації. Ці деформації є неминучими в масивних бетонних конструкціях, які розігріваються в молодому віці бетону від екзотермії, а потім вистигають із плином часу. Температурні деформації властиві також спорудам, які

знаходяться на відкритому повітрі і піддаються атмосферним впливам, що мають періодичний характер. Аналогічний вплив чинять на конструкції технологічні цикли, наприклад в автоклавах, пропарочних камерах, гарячих цехах, тощо. Особливо небезпечними є різкі зміни температури при пожежі.

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

Для розрахунку температурних напружень і деформацій бетону в першу чергу необхідно знати величину вільних температурних деформацій. Величина цих деформацій характеризується коефіцієнтом лінійного температурного розширення, який рівний 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.

Отже, теоретичні дослідження температурних напружень і деформацій для залізобетонних конструкцій на основі математичних моделей з проведенням числових експериментів, є актуальною задачею.

Мета і задача дослідження. Метою роботи є розробка методики визначення та дослідження температурних деформацій і температурних напружень в залізобетонних циліндричних елементах конструкцій з врахуванням геометричних і теплофізичних параметрів металу і бетону.

Короткий опис існуючих публікацій. Методи розрахунку температурних деформацій і термонапружень в однорідних конструкціях достатньо повно розроблені в [1,2]. В цих роботах показано, що температурні напруження і деформації обумовлені величиною температури, її градієнтом і швидкістю зміни температури. На величину температурних деформацій і напружень впливають теплофізичні і механічні характеристики матеріалу з якого виготовлена конструкція.

Залізобетонні конструкції є кусково-однорідними. На їх напружено-деформований стан при дії температури значний вплив має неоднорідність. В кусково-однорідних конструкціях величина температурних деформацій залежить не тільки від коефіцієнта лінійного температурного розширення матеріалів з яких виготовлені складові елементи конструкції, але і від їх різниці, а також різниці значень модулів пружності і коефіцієнтів Пуассона. Методи дослідження неоднорідних конструкцій в основному розробляються лише останні три десятиліття і в літературі висвітлені недостатньо. Це зв'язано з значними математичними труднощами, що виникають при розв'язку диференціальних рівнянь, які враховують неоднорідність.

Методи дослідження. В роботі на основі розроблених методик визначення та дослідження температурних напружень і деформацій в кусково-однорідних конструкціях [3], досліджено напружено-деформований стан залізобетонної циліндричної колони. Одержані 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.

Постановка задачі та її розв'язання. Розглянемо залізобетонну коаксіальну колону радіусом R_2 в центрі якої знаходиться арматура радіуса R_1 . Для аналітичних досліджень

виберемо циліндричну систему координат r, φ, z сумістивши вісь z з віссю циліндра. Розглянемо випадок, коли температурне поле колони симетричне відносно осі циліндра і постійне по всій довжині. Визначимо і дослідимо напружено-деформований стан колони в залежності від температури.

Відлік зміни температури будемо проводити від значення при якому в неоднорідній колоні відсутнє напруження. Оскільки температура в поперечному перерізі коаксіального циліндра змінюється симетрично до його осі, то переміщення точок перерізу не залежить від координат φ , а в напрямку r буде залежати від значення коефіцієнтів температурного розширення матеріалів, з яких виготовлена колона; від зміни температури; коефіцієнта Пуассона і модуля Юнга.

Радіальне переміщення u_i можна знайти, розв'язавши диференціальне рівняння [4]

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

де u_i – переміщення i -го шару вздовж радіуса r ; $\alpha_i^{(i)}$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення; ν_i – коефіцієнт Пуассона, $i = 1, 2$; $T(r)$ – температура, що змінюється вздовж радіуса.

Величини, які відносяться до центрального циліндра (арматури) будемо позначати індексом 1, а величини, які відносяться до зовнішнього циліндра – індексом 2.

Для зручності інтегрування запишемо рівняння (1) у вигляді: $\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(ur)}{dr} \right) = \frac{1 + \nu_i}{1 - \nu_i} \alpha_i^{(i)} \frac{dT(r)}{dr}$. Проінтегрувавши його двічі по r , знайдемо загальний розв'язок рівняння (1)

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

де A_i і B_i – сталі інтегрування, які знаходяться з граничних умов.

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

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)} &= -\frac{\alpha_i^{(i)} E_i}{1 - \nu_i} \frac{1}{r^2} \int_{R_i}^r T(r) r dr + \frac{E_i}{1 + \nu_i} \left(\frac{A_i}{1 - 2\nu_i} - \frac{B_i}{r^2} \right), \\ \sigma_\theta^{(i)} &= \frac{\alpha_i^{(i)} E_i}{1 - \nu_i} \frac{1}{r^2} \int_{R_i}^r T(r) r dr - \frac{\alpha_i^{(i)} E_i T(r)}{1 - \nu_i} + \frac{E_i}{1 + \nu_i} \left(\frac{A_i}{1 - 2\nu_i} + \frac{B_i}{r^2} \right), \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (3)$$

де $\sigma_r^{(i)}$, $\sigma_\theta^{(i)}$ – радіальні і кільцеві температурні напруження.

Постійні інтегрування A_i і B_i знайдемо з рівності переміщень (2) і радіальних напружень на поверхні контакту металу і бетону $r = R_1$, а також з рівності нулю переміщень при і радіальних напружень при $r = R_2$

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

Розглянемо випадок, коли температура змінилася на деяку постійну величину $T = T_1 = const$. Тоді вирази (2) і (3) для знаходження переміщень і температурних напружень в арматурі запишемо в такому виді

$$\begin{aligned}
 U_1 &= \nu_1^* T_1 \cdot r + A_1 \cdot r + \frac{B_1}{r}, \\
 \sigma_r^{(1)} &= -e_1 T_1 + K_1 \left(\frac{A_1}{1-2\nu_1} - \frac{B_1}{r^2} \right), \\
 \sigma_\theta^{(1)} &= -e_1 T_1 + K_1 \left(\frac{A_1}{1-2\nu_1} + \frac{B_1}{r^2} \right).
 \end{aligned} \tag{5}$$

Для порожнистого бетонного циліндра вирази (2) і (3) приймуть вигляд

$$\begin{aligned}
 U_2 &= \nu_2^* T_1 \left(r - \frac{R_1^2}{r} \right) + A_2 r + \frac{B_2}{r}, \\
 \sigma_r^{(2)} &= -e_2 T_1 \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2} \right) + K_2 \left(\frac{A_2}{1-2\nu_2} - \frac{B_2}{r^2} \right), \\
 \sigma_\theta^{(2)} &= -e_2 T_1 \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2} \right) + K_2 \left(\frac{A_2}{1-2\nu_2} + \frac{B_2}{r^2} \right).
 \end{aligned} \tag{6}$$

Підставивши перші два вирази (5) і (6) в умови (4) та розв'язавши систему одержаних чотирьох рівнянь відносно A_1, B_1, A_2, B_2 , одержимо

$$\begin{aligned}
 A_1 &= B_2 \left(m_2 + \frac{1}{R_1^2} \right) + n_2 - \nu_1^* T_1, & B_1 &= 0 \\
 A_2 &= B_2 m_2 + n_2, & B_2 &= \frac{-e_1 T_1 - \nu_1^* d_1 T_1 - n_2 (d_2 - d_1)}{m_2 (d_2 - d_1) - \frac{K_2}{R_1^2} - d_1 \frac{1}{R_1^2}},
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\text{де } m_2 = \frac{1-2\nu_2}{R_2^2}, \quad n_2 = \frac{e_2 T_1 (1-2\nu_2)}{K_2} \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right);$$

$$e_i = \frac{\alpha_i^{(i)} E_2}{2(1-\nu_i)}, \quad i=1,2;$$

$$\nu_i^* = \frac{1+\nu_i}{2(1-\nu_i)} \alpha_i^{(i)};$$

$$K_i = \frac{E_i}{1+\nu_i};$$

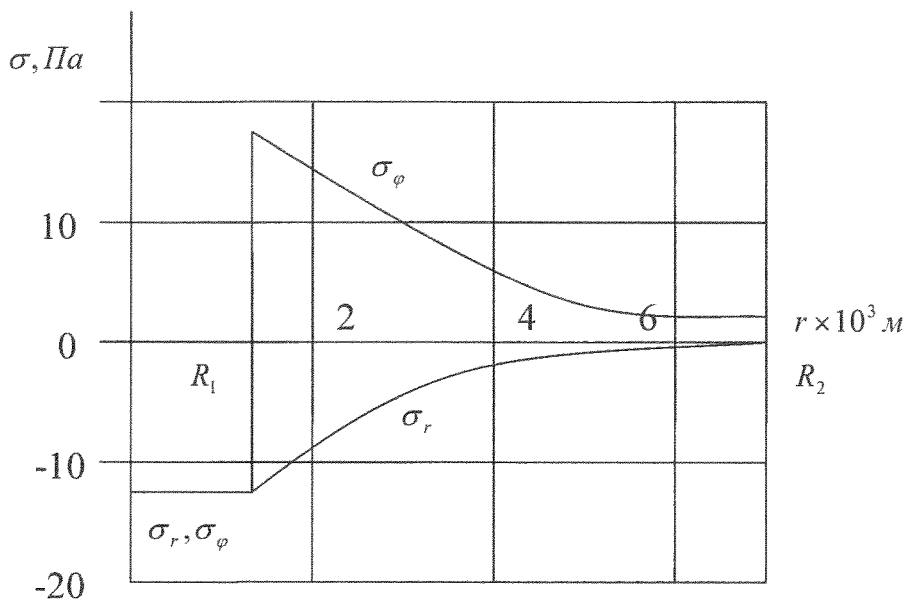
$$d_i = \frac{K_i}{1-2\nu_i}.$$

Враховуючи вирази (7) за формулами (5) і (6) проведено розрахунки радіальних σ_r і кільцевих σ_θ температурних напружень в залізобетонному коаксіальному циліндрі при його нагріві на $T_1 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$. При цьому прийнято, що радіус арматури $R_1 = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, зовнішній радіус бетону $R_2 = 70 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Механічні і теплофізичні характеристики приймалися рівними:

$$E_1 = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \quad \nu_1 = 0,25, \quad \alpha_1^{(1)} = 14 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}},$$

$$E_2 = 2,6 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \quad \nu_2 = 0,17, \quad \alpha_2^{(2)} = 10 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

Результати досліджень зображені графічно на рисунку.



Зміна температурних напружень вздовж радіуса залізобетонного циліндра

Висновки. Аналіз одержаних результатів показує, що температурні напруження досягають максимальних значень в арматурі і є стискаючими, при тому радіальні напруження σ_r рівні за величиною кільцевим напруженням σ_θ . В бетоні радіальні напруження плавно зменшуються і на поверхні $r = R_2$ рівні нулю. Кільцеві напруження на поверхні з'єднання арматура–бетон ($r = R_1$) стрибкоподібні змінюються з стискаючих на розтягуючі і в бетоні плавно зменшуються при підході до поверхні $r = R_2$. На цій поверхні їх величина становить $\approx 8\%$ від значення, яке вони мають на поверхні з'єднання арматура-бетон ($r = R_1$).

Одержана методика дозволяє підібрати арматуру і бетон таких марок, щоб при зміні температури, особливо при пожежі, в залізобетонних конструкціях виникали мінімально можливі величини температурних напружень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Кирилов А.П. Железобетонные корпуса ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
2. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. – М.: Стройиздат, 1973. – 368 с.
3. Подстригач Я.С., Ломакин В.А., Коляно Ю.М. Термоупругость тел неоднородной структуры. – М.: Наука, 1984. – 368 с.
4. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.