

УДК 359.3

ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ТІЛ ОБЕРТАННЯ З ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ

М. Г. СТАЩУК¹, Є. М. ІРЗА²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів

Запропоновано методику розрахунку термонапруженого стану пружних тіл обертання з функціонально-градієнтних матеріалів. Формулюванням математичної задачі передбачено теплове навантаження. Розроблено числовий алгоритм розв'язання відповідної задачі та реалізовано його для задач теплопровідності й термопружності. Розраховано термопружний стан порожнистого циліндра за заданим режимом нагріву за різних коефіцієнтів теплопровідності та лінійного температурного розширення, питомої теплоємності, модуля пружності. На цій основі графічно проілюстровано зміну термонапруженого стану порожнистого циліндра.

Ключові слова: *термопружний стан, тіло обертання, функціонально-градієнтний матеріал, метод скінченних елементів, порожнистий циліндр.*

Вступ. В останні роки відбулися великі зміни в нанотехнологіях. Завдяки ним отримано матеріали з фізико-механічними характеристиками, які неперервно залежать від просторової координати і температури. Такі матеріали назвали функціонально-градієнтні. Конструкції з пружних функціонально-градієнтних матеріалів досить часто нагрівають, а потім охолоджують. В результаті дії температурних полів у них виникають температурні напруження, які можуть перевищувати допустимі значення і призводити до руйнування конструкцій. Основні дослідження стосуються тіл обертання. Розрахунку термонапруженого стану в тілах обертання з функціонально-градієнтних матеріалів за теплового навантаження присвячені численні публікації, зокрема [1–4]. Здебільшого у цих прикладних працях форма тіла обертання канонічна. Порівняно з існуючими в літературі дослідженнями в цьому напрямі, тут запропоновано математичну методику визначення термонапруженого стану тіл обертання з пружних функціонально-градієнтних матеріалів, форма яких відмінна від канонічної. Теплофізичні характеристики тіла є залежними від просторової координати і температури. Запропонована методика передбачає: математичне формулювання задачі; розробку числового алгоритму пошуку розв'язку; програмну реалізацію числового алгоритму.

Формулювання задачі. Вважаємо, що за розглядуваних теплових навантажень напружений стан тіла не впливає на його температуру, тобто задачу про визначення напружено-деформованого стану в тілі формуємо в квазістатичній поставі (в переміщеннях). Тіло обертання займає область Ω евклідового простору R^3 і обмежене неперервною за Ліпшицем поверхнею Γ . Тіло належить до криволінійної циліндричної системи координат $O\gamma\varphi z$. На частині Γ_u поверхні Γ тіла задані переміщення $\vec{u} = \vec{u}_0$, а на частині Γ_σ – силове навантаження, яке характеризується вектором \vec{p} , $\Gamma_u \cup \Gamma_\sigma = \Gamma$. Неоднорідна структура матеріалу тіла

Контактна особа: М. Г. СТАЩУК, e-mail: stashchuk@ipm.lviv.ua

відображається фізико-механічними характеристиками, які є залежними від просторової координати і температури. Тіло піддають технологічному осесиметричному нагріванню зовнішнім середовищем з температурою $t_c(\tau)$ через частину поверхні Γ_t , тепловим потоком $q(\tau)$ через частину поверхні Γ_q , ($\Gamma_t \cup \Gamma_q = \Gamma$), а також розподіленими джерелами тепла потужності $Q(\vec{r}, \tau)$, ($\vec{r} \in \Omega$). Температурне поле в тілі описуємо відомим рівнянням теплопровідності [5]:

$$1/r \cdot \partial/\partial r (rk \cdot \partial t/\partial r) + \partial/\partial z (k \cdot \partial t/\partial z) + Q = c\rho \cdot \partial t/\partial \tau, \quad (1)$$

за таких початкової і крайових умов

$$t(r, z, 0) = t_0(r, z); \quad [k(\partial t/\partial r \cdot n_r + \partial t/\partial z \cdot n_z) + \alpha(t - t_c)]_{\Gamma_t} = 0, \\ [k(\partial t/\partial r \cdot n_r + \partial t/\partial z \cdot n_z) + q]_{\Gamma_q} = 0. \quad (2)$$

Тут $k(s, t)$ – коефіцієнт теплопровідності; $c(s, t)$ – питома теплоємність; $\rho(s, t)$ – густина; α – коефіцієнт тепловіддачі; n_r, n_z – компоненти зовнішньої нормалі до поверхні тіла; s – просторова координата в напрямку неоднорідності фізико-механічних властивостей матеріалу тіла; τ – біжучий час; r, z – просторові координати точки.

Зв'язок між компонентами тензорів напружень $\{\sigma\}$ і деформацій $\{\varepsilon\}$ беремо у вигляді [1]

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_t\}), \quad (3)$$

де $[D]$ – матриця пружних характеристик; $\{\varepsilon_t\}$ – тензор температурного навантаження.

У циліндричній системі координат (для осесиметричного випадку) ці тензори зображені через компоненти так:

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_{rr} \ \sigma_{\varphi\varphi} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{rz}], \quad \{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_{rr} \ \varepsilon_{\varphi\varphi} \ \varepsilon_{zz} \ \varepsilon_{rz}], \\ \{\varepsilon_t\}^T = [1 \ 1 \ 1 \ 0] \cdot \int_{t_0}^t \alpha_t(s, \zeta) d\zeta. \quad (4)$$

Тут $\alpha_t(s, t)$ – коефіцієнт лінійного температурного розширення.

Матриця пружних характеристик має вигляд

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де $E(s, t)$ – модуль пружності; $\nu(s, t)$ – коефіцієнт Пуассона.

В області Ω повинні виконуватися рівняння рівноваги і крайові умови:

$$\partial\sigma_{rr}/\partial r + \partial\sigma_{rz}/\partial z + (\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi})/r = 0, \quad \partial\sigma_{rz}/\partial r + \partial\sigma_{zz}/\partial z + \sigma_{rz}/r = 0; \quad (6)$$

$$n_r\sigma_{rr} + n_z\sigma_{zz} - p_r = 0, \quad n_r\sigma_{rz} + n_z\sigma_{zz} - p_z = 0 \quad \text{на } \Gamma_\sigma, \quad (7)$$

$$u_r = u_r^0, \quad u_z = u_z^0 \quad \text{на } \Gamma_u.$$

Обмежимося малими деформаціями. Зв'язок між компонентами тензора деформацій і вектора переміщень такий:

$$\varepsilon_{rr} = \partial u_r / \partial r, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = u_r / r, \quad \varepsilon_{zz} = \partial u_z / \partial z, \quad \varepsilon_{rz} = \partial u_r / \partial z + \partial u_z / \partial r. \quad (8)$$

Задачу формуємо в квазістатичній поставі і в переміщеннях. Залежності (1)–(8) складають повну систему співвідношень для визначення температурного поля, компонент вектора переміщень та тензорів деформацій і напружень за заданих температури навколишнього середовища t_c , теплового потоку q , зовнішнього силового навантаження \bar{p} і потужності внутрішніх джерел тепла Q .

Методика розв'язування задачі термонапруженого стану тіла обертання з функціонально-градієнтного матеріалу. Оскільки геометрична конфігурація області, яку займає тіло, часто є досить складна і система розглянутих диференціальних рівнянь є нелінійна, під час розв'язування використали метод зважених залишків у поєднанні з кінцево-елементним підходом [5, 6]. Він дає змогу отримати ефективні наближені розв'язки сформульованих задач. У запропонованому підході алгоритм розв'язання даних задач враховує: розбиття області, яку займає тіло, на елементи; апроксимацію невідомих функцій на елементі розбиття; отримання на цій основі системи алгебричних рівнянь стосовно значень невідомих функцій у вузлах елементів та вибору алгоритму розв'язування цієї системи.

Згідно з концепцією методу скінченних елементів, ділимо області Ω на скінченне число n_e підобластей $\Omega^{(e)}$ так, щоб виконувались умови:

$$\forall e, m : e = 1, \dots, n_e, \quad m = 1, \dots, n_e, \quad \Omega^{(e)} \cap \Omega^{(m)} = \emptyset, \quad e \neq m \quad \text{та} \quad \Omega = \bigcup_{e=1}^{n_e} \Omega^{(e)}.$$

Під час ділення області використовуємо осесиметричні біквадратичні (8 вузлів) ізопараметричні скінченні елементи. Апроксимацію скалярної величини t (температури) на скінченному елементі подаємо за допомогою функції форми у вигляді [6]

$$t^{(e)} = \left[N_1^{(e)} \dots N_8^{(e)} \right] \begin{Bmatrix} T_1^{(e)} \\ \vdots \\ T_8^{(e)} \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

де $N_i^{(e)}$ – базова функція елемента, яка називається функцією форми, причому $N_i^{(e)} = 1$ у вузлі i , та рівна нулю в усіх інших вузлах; $T_i^{(e)}$ – значення функції t в i -му вузлі. Векторну величину \vec{u} (переміщення) подаємо через її компоненти, які розглядають як невідомі скалярні величини. В кожному вузлі буде дві невідомі, які запишемо так [6]:

$$\begin{Bmatrix} u_r^{(e)} \\ u_z^{(e)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1^{(e)} & 0 & \dots & N_8^{(e)} & 0 \\ 0 & N_1^{(e)} & \dots & 0 & N_8^{(e)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1^{(e)} \\ \vdots \\ U_{16}^{(e)} \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

де $U_1^{(e)}, \dots, U_{15}^{(e)}$ та $U_2^{(e)}, \dots, U_{16}^{(e)}$ – значення компонентів u_r і u_z у вузлах елементів, відповідно.

Задача теплопровідності. Розглянемо задачу теплопровідності (1), (2). Використовуючи метод зважених залишків (зокрема метод Гальоркіна) в поєднанні

з методом скінченних елементів, рівняння теплопровідності (1), враховуючи крайові умови (2), зводимо до вигляду [6]

$$[C_t] d\{T\}/d\tau + [K_t]\{T\} = \{f_t\}. \quad (11)$$

Тут $[C_t]$, $[K_t]$, $\{f_t\}$ – відповідні температурні матриці жорсткості і вектор навантаження, які мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} [C_t] &= \sum_{j=1}^{n_e} \int_{\Omega^{(j)}} \rho c [N^{(j)}]^T [N^{(j)}] d\Omega, \\ [K_t] &= \sum_{j=1}^{n_e} \int_{\Omega^{(j)}} [B^{(j)}]^T [D_t^{(j)}] [B^{(j)}] d\Omega + \sum_{j=1}^{n_{e1}} \int_{\Gamma_t^{(j)}} \alpha [N^{(j)}]^T [N^{(j)}] d\Gamma, \\ \{f_t\} &= \sum_{j=1}^{n_e} [N^{(j)}]^T Q d\Omega + \sum_{j=1}^{n_{e1}} \int_{\Gamma_t^{(j)}} \alpha [N^{(j)}]^T t_c d\Gamma + \sum_{j=1}^{n_{e2}} [N^{(j)}]^T q d\Gamma, \\ [B^{(j)}] &= \begin{bmatrix} \partial N_1^{(j)} / \partial r & \dots & \partial N_8^{(j)} / \partial r \\ \partial N_1^{(j)} / \partial z & \dots & \partial N_8^{(j)} / \partial z \end{bmatrix}, \quad [D_t^{(j)}] = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Використавши метод скінченних різниць (поділивши проміжок $[0, \tau_k]$ на дискретну множину точок τ_0, τ_1, \dots з кроком $\Delta\tau$), з (11) отримуємо систему нелінійних алгебричних рівнянь

$$([C_t] + \theta \Delta\tau [K_t])\{T\}_{n+1} - ([C_t] - (1-\theta)\Delta\tau [K_t])\{T\}_n = \{f_t\}_n, \quad (12)$$

де індексами $n, n+1$ позначено значення величини в момент часу τ_n, τ_{n+1} , відповідно.

Вибравши точки колокації θ , співвідношення (12) можна перетворити в одну із відомих скінченно-різницевоїх схем для рівняння (11), а саме [6]: при $\theta = 0$ – схему Ейлера, $\theta = 0,5$ – схему Кранка–Нікольсона, $\theta = 0,66667$ – метод Гальоркіна. Нелінійну систему алгебричних рівнянь (12) розв'язуємо за допомогою ітераційного методу [7].

Задача термомпружності. Системи рівнянь (3)–(8), які описують модель поведінки термомпружного тіла, з використанням методу зважених залишків у поєднанні з методом скінченних елементів зводимо до вигляду

$$[K_u]\{U(\tau)\} = \{F_0(\tau)\}. \quad (13)$$

Тут $[K_u]$, $\{F_0\}$ – відповідно матриця жорсткості і вектор навантаження, які мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} [K_u] &= \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega^{(e)}} [B_u^{(e)}]^T [D_0^{(e)}] [B_u^{(e)}] d\Omega; \\ \{F_0\} &= \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega^{(e)}} [B_u^{(e)}]^T [D_0^{(e)}] \{\epsilon_t^{(e)}\} d\Omega + \\ &+ \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega^{(e)}} [N_u^{(e)}]^T \{X^{(e)}\} d\Omega + \sum_{e=\Gamma_\sigma^{(e)}}^{n_{e1}} \int_{\Gamma_\sigma^{(e)}} [N_u^{(e)}]^T \{p^{(e)}\} d\Gamma; \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} B_u^{(e)} \end{bmatrix} = [Z] \begin{bmatrix} N_u^{(e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial r & 0 \\ 1/r & 0 \\ 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial z & \partial/\partial r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 & 0 & \dots & N_8 & 0 \\ 0 & N_1 & \dots & 0 & N_8 \end{bmatrix}.$$

Нелінійну систему алгебричних рівнянь (13) розв'язуємо також за допомогою ітераційного методу.

Термонапружений стан у порожнистому циліндрі за нагріву–охолодження. Запропонована модель використана для визначення термонапруженого стану у порожнистому циліндрі (рис. 1), виготовленому з пружного функціонально-градієнтного матеріалу в напрямку осі Or , висотою $z_1 = 0,1$ м. На рис. 2 наведений температурний режим нагріву порожнистого циліндра, який характерний для багатьох виробничих процесів.

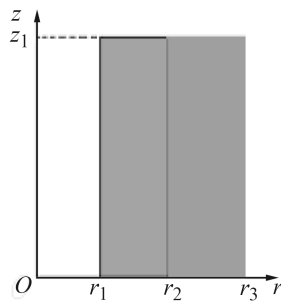


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Осьовий переріз циліндра.

Fig. 1. Axial section of a cylinder.

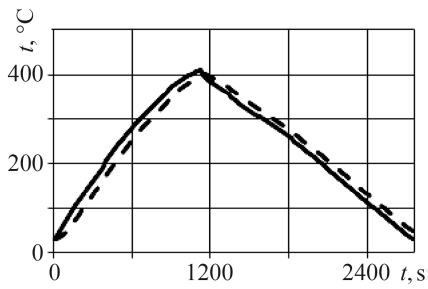


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Температурний режим нагріву порожнистого циліндра (суцільна лінія – зовнішня поверхня, пунктирна – внутрішня).

Fig. 2. Temperature mode of a hollow cylinder heating (solid line is external, and dashed one is the inner surface).

Теплофізичні характеристики функціонально-градієнтного матеріалу, які притаманні силікатним матеріалам, наведені на рис. 3 (заміри здійснені для точок з координатами $r_1 = 0,206$ м, $r_2 = 0,211$ м, $r_3 = 0,216$ м).

Оскільки фізико-механічні характеристики матеріалу циліндра залежні від температури і просторової координати в напрямку осі Or , їх дискретизацію виконуємо за схемою на прикладі коефіцієнта теплопровідності k . Спочатку графічну залежність (рис. 3а) коефіцієнта теплопровідності від температури і координати r подаємо у вигляді таблиці.

Коефіцієнт теплопровідності k за довільної температури t і координати r знаходимо за алгоритмом (лінійна апроксимація)

$$k(t, r) = \begin{bmatrix} N_{ij} & N_{i+1j} & N_{ij+1} & N_{i+1j+1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_{ij} \\ k_{i+1j} \\ k_{ij+1} \\ k_{i+1j+1} \end{Bmatrix} = [N] \{K\}. \quad (14)$$

Тут k_{ij} , k_{i+1j} , k_{ij+1} , k_{i+1j+1} відомі табличні значення коефіцієнта теплопровідності, між якими розташоване невідоме значення k за відомих температури t і

координати r , а N_{ij} , N_{i+1j} , N_{ij+1} , N_{i+1j+1} є функціями форми, які мають такий вигляд:

$$N_{ij} = \left(1 - \frac{r - r_i}{r_{i+1} - r_i}\right) \left(1 - \frac{t - t_j}{t_{j+1} - t_j}\right); \quad N_{i+1j} = \left(\frac{r - r_i}{r_{i+1} - r_i}\right) \left(1 - \frac{t - t_j}{t_{j+1} - t_j}\right);$$

$$N_{ij+1} = \left(1 - \frac{r - r_i}{r_{i+1} - r_i}\right) \left(\frac{t - t_j}{t_{j+1} - t_j}\right); \quad N_{i+1j+1} = \left(\frac{r - r_i}{r_{i+1} - r_i}\right) \left(\frac{t - t_j}{t_{j+1} - t_j}\right).$$

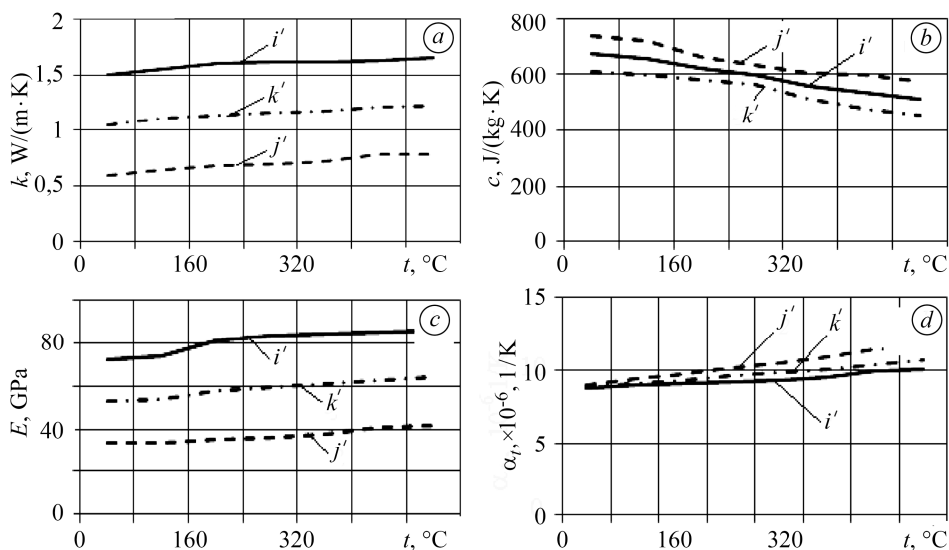


Рис. 3. Теплофізичні характеристики функціонально-градієнтного матеріалу порожнистого циліндра: a – коефіцієнт теплопровідності, b – питома теплоємність, c – модуль пружності, d – коефіцієнт лінійного температурного розширення (i' , j' , k' – точки заміру).

Fig. 3. Thermophysical characteristics of the functionally-graded material of a hollow cylinder: a – coefficient of thermal conductivity, b – specific heat, c – elastic modulus, d – linear temperature expansion (i' , j' , k' – measuring points).

Залежність коефіцієнта теплопровідності k від температури t і координати r

k , W/(m·K)		r , m		
		0,206	0,211	0,216
t , °C	0	1,50	0,60	1,05
	80	1,55	0,65	1,11
	160	1,60	0,68	1,14
	240	1,61	0,70	1,16
	320	1,62	0,72	1,17
	400	1,63	0,78	1,21
	480	1,66	0,79	1,23

Аналогічно апроксимуємо інші фізико-механічні характеристики матеріалу.

Термонапружений стан порожнистого циліндра знаходимо за алгоритмами (12), (13). За наведеного режиму нагріву (див. рис. 2) розраховано термонапружений стан у циліндрі для трьох варіантів. Перший (рис. 4а) відповідає теплофізичним характеристикам матеріалу в точках заміру i' , j' , k' (див. рис. 3), другий (рис. 4b) – i' , k' , j' , а третій (рис. 4c) – k' , i' , j' .

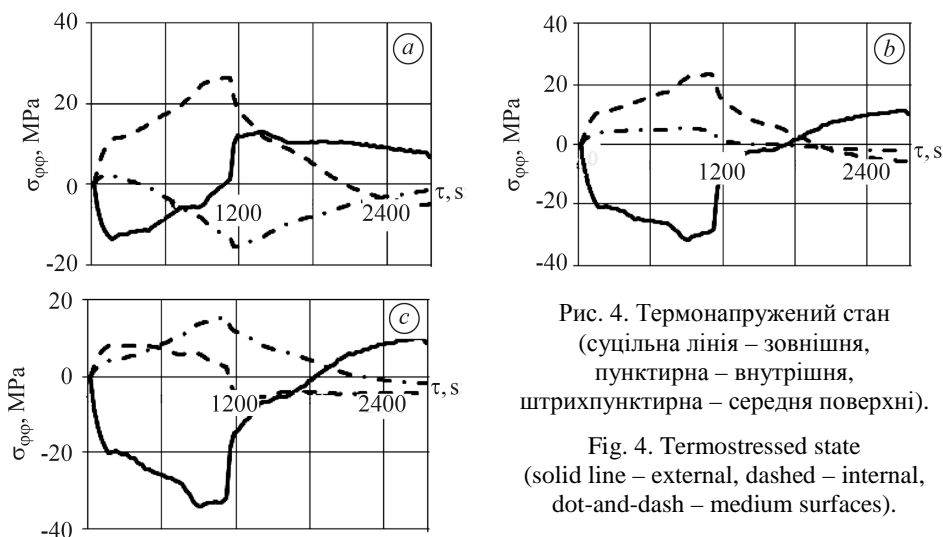


Рис. 4. Термонапружений стан (суцільна лінія – зовнішня, пунктирна – внутрішня, штрихпунктирна – середня поверхні).

Fig. 4. Thermostressed state (solid line – external, dashed – internal, dot-and-dash – medium surfaces).

Виявили (рис. 4), що рівень розтягальних напружень суттєво залежить від властивостей функціонально-градієнтного матеріалу за товщиною циліндра. Максимальний рівень розтягальних напружень 25 МПа відповідає характеристикам матеріалу в точках заміру i' , j' , k' , максимальний 18 МПа – k' , i' , j' . Це дозволяє моделювати оцінку міцності конструкції за експлуатації через підбір неоднорідних властивостей фізико-механічних характеристик матеріалу. Моделі термонапруженого стану функціонально-градієнтного типу є застосовними для вивчення руйнування, вони враховують наводнювання й зневоднювання матеріалів [8–10].

ВИСНОВКИ

Запропонована числова методика визначення напружень у тілах обертання, виготовлених з пружного функціонально-градієнтного матеріалу, за їх нагріву–охолодження дає можливість розв'язувати широкий клас задач, які пов'язані з дослідженням параметрів, що характеризують теплові і механічні процеси в конструкціях. Числові результати (рис. 4) вказують, що реальна міцність конструкцій та час експлуатації суттєво залежить від підбору неоднорідних властивостей фізико-механічних характеристик матеріалу. Розроблену числово-аналітичну модель можна удосконалити, використовуючи праці [8–10].

РЕЗЮМЕ. Предложена методика расчета термонапряженного состояния упругих тел вращения из функционально-градиентных материалов. Постановкой математической задачи предусмотрено тепловую нагрузку. Разработан числовой алгоритм решения соответствующей задачи и осуществлена его реализация для задач теплопроводности и термоупругости. Рассчитано термоупругое состояние полого цилиндра при заданном режиме нагрева при разных коэффициентах теплопроводности и линейного температурного расширения, удельной теплоемкости, модуле упругости. На этой основе графически проиллюстрировано изменение напряженного состояния полого цилиндра.

SUMMARY. A method for calculating the thermostressed state of elastic bodies of revolution from functionally gradient materials is proposed. The formulation of a mathematical prob-

lem provides heat loading. A numerical algorithm for solving the corresponding problem has been developed and implemented for the problems of heat conduction and thermoelasticity. The thermoelastic state of the hollow cylinder is calculated at the given heating mode for different heat conductivity coefficients, modulus of elasticity and linear temperature expansion. On this basis the change in the stress state of the hollow cylinder is graphically illustrated.

1. *Аналитическое* решение смешанных осесимметричных задач для функционально-градиентных сред / С. М. Айзикович, В. М. Александров, А. С. Васильев, Л. И. Кренин, И. С. Трубочник. – М.: Физматлит, 2011. – 192 с.
2. *Никишин В. С., Шаниро Г. С.* Задачи теории упругости для многослойных сред. – М.: Наука, 1973. – 210 с.
3. *Aboudi J., Pindera M. J., and Arnold S. M.* Higher-order theory for functionally graded materials // *Composites*. – 1999. – **30**, № 8. – P. 777–832.
4. *Kawasaki A. and Watanabe R.* Thermal fracture behavior of metal/ceramic functionally graded materials // *Engng. Fract. Mech.* – 2002. – № 69. – P. 1713–1728.
5. *Irza E. M.* Математичне моделювання формування залишкових напружень у скляних тілах обертання під час охолодження // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2008. – **44**, № 2. – С. 14–18.
(*Irza E. M.* Mathematical model of the formation of residual stresses in glass bodies of revolution in the process of cooling // *Materials Science*. – 2008. – **44**, № 2. – P. 156–162.)
6. *Zienkiewicz O. C. and Taylor R. L.* Finite Element Method: Vol. 1. The Basis. – London: Butterworth Heinemann, 2000. – 690 p.
7. *Турчак Л. И.* Основы численных методов. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
8. *Івас'кевич Л. М.* Вплив температури та циклічного навантаження на водневе окрихчення нікелевих жароміцних сплавів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2011. – **47**, № 1. – С. 70–75.
(*Ivas'kevych L. M.* Influence of temperature and cyclic loading on hydrogen embrittlement of nickel refractory alloys // *Materials Science*. – 2011. – **47**, № 1. – P. 76–81.)
9. *Сташук М. Г.* Напруження, викликані концентрацією водню у суцільному циліндрі // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2017. – **53**, № 6. – С. 36–44.
(*Stashchuk M. H.* Determination of the distribution of hydrogen near cracklike defects // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 6. – P. 803–810.)
10. *Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Гембара О. В.* Метод оцінки високотемпературного водневого руйнування біметалевих елементів конструкцій // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2000. – **36**, № 4. – С. 15–22.
(*Andreikiv O. E., Skal's'kyi V. R., and Gembara O. V.* A method for the investigation of high-temperature hydrogen-assisted fracture of bimetallic structural elements // *Materials Science*. – 2000. – **36**, № 4. – P. 489–498.)

Одержано 16.01.2019