

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОПРУЖНОГО СТАНУ ТЕРМОЧУТЛИВОГО ПОРОЖНИСТОГО ЦИЛІНДРА ЗА ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯ КИПІННЯМ РІДИНИ

Ірина Ракоча

Національний університет «Львівська політехніка», irinka.rakocha@gmail.com

Знання про компоненти напружено-деформованого стану елементів конструкцій, зокрема, порожнистих циліндрів [1], за заданого силового та теплового навантажень лежать в основі їх розрахунку на міцність і надійність. За їх експлуатації в умовах високотемпературного нагрівання адекватне визначення температурного поля та спричиненого ним напружено-деформованого стану, здійснюють на основі моделі термочутливого тіла [1, 2], в якій враховують залежність теплових та механічних характеристик, а також параметрів теплообміну (коефіцієнтів теплообміну, ступенів чорноти поверхонь) від температури.

Для більш ефективного відведення тепла з поверхонь термочутливих тіл часто використовують явище конвективного теплообміну (коли критична температура є меншою від температури кипіння рідини, що подається на обмежувальну поверхню тіла), або явище кипіння рідини [3] (коли температура кипіння рідини є нижчою від температури тіла). Зауважимо, що утворений шар рідини повинен мати набагато меншу товщину, ніж товщина тіла.

У цій роботі на основі моделі термочутливого тіла визначено стаціонарний розподіл температури в елементі мікроелектроніки, який моделюють тришаровим порожнистим термочутливим циліндром з наявними в другому шарі джерелами тепла, коли через внутрішню циліндричну поверхню  $r = r_1$  відбувається конвективний теплообмін із середовищем, температура якого  $t = t_{c1}$ , а на зовнішній  $r = r_4$  – тепловідведення шляхом кипіння рідини за температури середовища  $t = t_{cn}$  та кипіння рідини  $t = t_{boil}$ . На межі дотику сусідніх шарів  $r = \{r_2, r_4\}$  виконуються умови ідеального теплового контакту.

Коефіцієнти теплообміну через обмежувальні поверхні –  $\alpha_1$  і  $\alpha_3$  відповідно.

Математична модель для визначення розподілу температури містить:

- рівняння теплопровідності

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \lambda_t^{(i)}(t_i) \frac{dt_i}{dr} \right) = W^{(i)}(r), \quad r_i < r < r_{i+1}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (1)$$

**Конференція молодих учених «Підстригачівські читання – 2016»,  
25–27 травня 2016 р., Львів**

- крайові умови на обмежувальних циліндричних поверхнях

$$\left[ \lambda_t^{(1)}(t_1) \frac{dt_1}{dr} - \alpha_1 (t_3 - t_{c1}) \right]_{r=r_1} = 0, \quad (2)$$

$$\left[ \lambda_t^{(3)}(t_3) \frac{dt_3}{dr} + \alpha_3 (t_3 - t_{cn}) + m_{\text{boil}} (t_3 - t_{\text{boil}})^3 \right]_{r=r_4} = 0; \quad (3)$$

- умови контакту на поверхнях дотику сусідніх складових циліндра

$$t_i|_{r=r_{i+1}} = t_{i+1}|_{r=r_{i+1}}, \quad i = \overline{1, 2}, \quad (4)$$

$$\lambda_t^{(i)}(t_i) \frac{dt_i}{dr} \Big|_{r=r_{i+1}} = \lambda_t^{(i+1)}(t_{i+1}) \frac{dt_{i+1}}{dr} \Big|_{r=r_{i+1}}, \quad i = \overline{1, 2}. \quad (5)$$

Метод побудови розв'язку [1] нелінійної задачі теплопровідності (1)-(5) включає такі кроки: 1) обезрозмірення математичної моделі; 2) апроксимація експериментально заданих залежностей коефіцієнтів теплопровідності від температури; 3) здійснення перетворення Кірхгофа; 4) розв'язання отриманої задачі на змінні Кірхгофа; 5) здійснення оберненого перетворення Кірхгофа.

Температурні залежності коефіцієнтів теплопровідності від температури подані так:  $\lambda_t^{(i)}(t_i) = \lambda_{t0}^{(i)} \lambda_*^{(i)}(T_i) = \lambda_{t0}^{(i)} (1 + k_i (T_i - T_p))$ , де  $k_i$  – задані сталі, а  $\lambda_{t0}^{(i)} = \lambda_t^{(i)}(t_p)$  – опорні значення коефіцієнтів теплопровідності. Визначення компонент напружено-деформованого стану здійснено за методикою [1].

1. Попович В. С., Калиняк Б. М. Математичне моделювання та методика визначення статичного термопружного стану багатопарових термочутливих циліндрів // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2014. – 57, № 2. – С. 169–186.
2. Кушнір Р. М., Попович В. С. Термопружність термочутливих тіл. – Львів: Сполум, 2009. – 412 с. – Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я. Й. Бурака, Р. М. Кушніра: В 5 т. – Т. 3.
3. Benjamin R. J., Balakrishnan A. R. Nucleation site density in pool boiling of saturated pure liquids. – Effect of surface microroughness and surface and liquid physical properties // Exp. Therm. Fluid Sci. – 1997. – 15, No. 1. – P. 32–42.

**MODELING AND INVESTIGATION OF THE THERMOSTRESSED  
STATE OF A THERMOSENSITIVE HOLLOW CYLINDER UNDER HEAT  
OUTFLOW THROUGH BOILING OF LIQUID**

*The formulation of the mathematical model and the method of definition and investigation of established temperature and stress-strain state components distributions of the finite three-layered by radial coordinate cylinder have been illustrated. The above takes place under condition of heat outflow through boiling of the liquid on one of the flat limiting surface. The mathematical model of thermosensitive body is used. The influence of the thermosensitivity of the material of cylinder components and intensity of boiling on the nature and extent of temperature and stresses distributions has been investigated.*