



Свдулов О.В.

Свдулов О.В., Свдулов Д.В.

ФДБОУ ВПО «Дагестанський державний
технічний університет», пр. імама Шаміля,
70, Махачкала, 367015, Росія.



Свдулов Д.В.

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ШАРУВАТИХ КОНСТРУКЦІЙ

У роботі розглянуто модель термоелектричного елемента шаруватої конструкції, а також показано результати його теоретичних досліджень. Модель термоелемента дає можливість досліджувати термомеханічні та теплофізичні процеси, що відбуваються в ньому, на основі розв'язку нестационарного рівняння теплопровідності, рівнянь рівноваги, суцільності та Дюгамеля-Неймана для багатошарової системи, чисельним методом кінцевих елементів. Результати подано у вигляді двомірних і одномірних графіків зміни температури, термомеханічних напружень і деформацій у різних точках термоелемента.

Ключові слова: термоелемент, холодильна установка, температурне поле, термомеханічні напруження й деформації, модель, чисельний метод кінцевих елементів.

This paper is concerned with a model of a layered thermoelectric element and presents the results of its theoretical studies. The thermoelement model makes it possible to study the thermophysical and thermomechanical processes occurring in it on the basis of solving the unsteady-state equation of thermal conductivity, the equilibrium, the continuity and the Duhamel-Neumann equations for a multi-layered system by a numerical finite element method. The results are represented as two-dimensional and one-dimensional plots of temperature, thermomechanical stresses and deformations at different thermoelement points.

Key words: thermoelement, cooling plant, temperature field, thermomechanical stresses and deformations, model, numerical finite element method.

Вступ

Тривалої, стійкої роботи низки приладів вдається досягти, лише створивши для них необхідні температурні умови. Як правило, температурні умови роботи теплонавантажених приладів забезпечуються спеціальними охолоджуючими системами, холодильними установками. Останні є досить різноманітними, складними, можуть мати значні габарити, масу, енергоспоживання. У більшості випадків маса, габарити, надійність терморегулюючих систем не завжди порівнювані з відповідними показниками об'єктів охолодження, особливо актуально це для мікромініатюрних обладнань із високими питомими тепловими потоками. Розв'язок завдання температурної стабілізації такої апаратури в цьому випадку може бути отриманий застосуванням у холодильних установках, термоелектричному обладнанні, що оптимально сполучаються з нею за найважливішими енергетичними і масогабаритними показниками.

Базовим елементом будь-якого термоелектричного приладу є напівпровідниковий термоелектричний елемент (ТЕ), різновиди якого досить докладно розглянуто в [1-3]. Серед них слід виділити термопарні, анізотропні, вихрові, короткозамкнені термоелементи, ТЕ, що працюють у магнітному полі та за високих градієнтів температури, а також п'єзотермоелементи. Найпоширеніше класичне П-подібне виконання цих елементів, коли напрямок електричного струму перпендикулярний напрямку теплового потоку на їх холодних і гарячих спаях. Однак при проектуванні відносно потужних малогабаритних холодильних установок (потужністю більше 1 кВт) на основі ТЕ даного типу актуальним є забезпечення їх надійної роботи упродовж усього циклу функціонування охолоджуваної апаратури.

Так, слабкоструміві термоелектричні батареї (ТЕБ), у випадку їх використання у великій кількості, мають недостатню надійність за рахунок росту числа ТЕ і відповідно паяних з'єднань, а також низькі термодинамічні характеристики. Потужноструміві П-подібні ТЕБ, стосовно цього є більш вигідними, але, через наявність більших теплових потоків на спаях мають низькі термомеханічні характеристики.

Для їх підвищення найчастіше застосовуються мідні комутаційні пластини зі свинцевими демпфуючими прокладками [4], які внаслідок своєї еластичності розвантажують вітки ТЕ від напружень, однак, одночасно збільшується електричний і тепловий опір контактів. За невеликих перепадів температур іноді застосовуються розрізні комутаційні пластини [5], тонка перемичка яких має пружність і невеликий електричний опір завдяки її малій довжині. У низці конструкцій застосовуються компенсовані комутаційні пластини й пластини з різною довжиною холодної та гарячої сторін ТЕ [4]. Обидві конструкції вимагають наявності збільшених зазорів між вітками ТЕ, що призводить до зростання величини теплового потоку від гарячих спаяв до холодних через ізоляцію та зменшує корисну холодопродуктивність.

У цих умовах доцільне застосування ТЕБ шаруватої конструкції (рис. 1), у яких напрямок електричного струму по довжині ТЕ не змінюється, конструкція не є жорсткою, внаслідок чого виникаючі в ній термомеханічні напруження можуть бути усунуті або значно знижені.

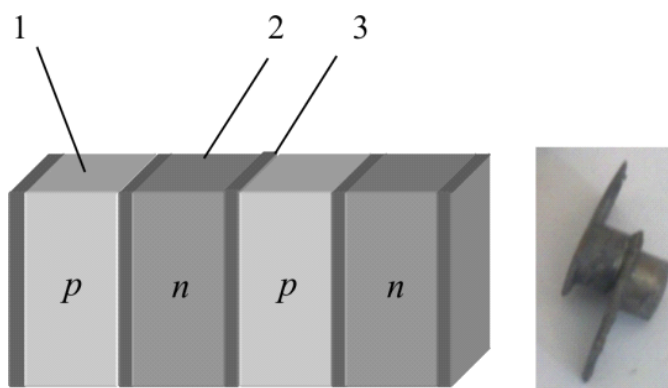


Рис. 1. Конструкція і зовнішній вигляд фрагмента шаруватої ТЕБ.

1 і 2 – вітки p- та n-типу, 3 – комутаційні пластини.

Дагестанським державним технічним університетом запатентовано низку рішень [6-14], що реалізують зазначений принцип, які відрізняються способом підведення й відведення теплоти до комутаційних елементів, а також деякими іншими конструктивними особливостями.

Мета пропонованої роботи – розробка моделі та теоретичні дослідження шаруватого ТЕ, що лежить в основі даних технічних розв'язків, наявність яких дають можливість оптимізувати й визначити найбільш доцільні режими роботи останніх.

Моделювання ТЕ шаруватої конструкції містить у собі розрахунки його температурного поля й на його основі визначення відповідних термомеханічних характеристик.

Моделювання теплофізичних процесів і розрахунки температурного поля шаруватого ТЕ

На практиці в більшості випадків під час експлуатації ТЕБ передбачається її теплоізоляція по бічній поверхні, за винятком поверхонь контакту з об'єктом охолодження та системою тепловідводу. Тому з достатнім ступенем точності з моделюванням ТЕ можна розглядати двомірне завдання теплопровідності. Для даних умов розрахункова схема має вигляд, що відповідає рис. 2. Области 1, 3 і 5 – комутаційні пластини, 2 і 4 – термоелектричний матеріал.

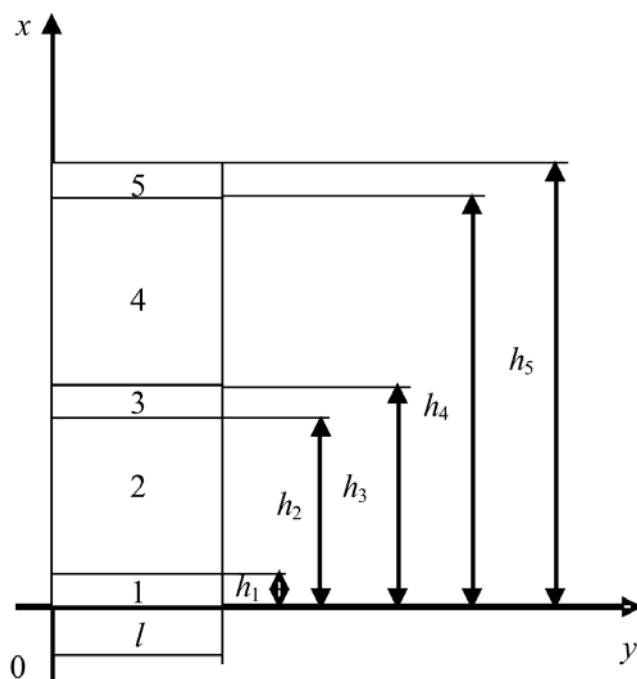


Рис. 2. Розрахункова схема шаруватого ТЕ.

Система диференціальних рівнянь теплопереносу для цієї схеми має вигляд

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + j^2 \Omega_1 &= C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t}, \\
 \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + j^2 \Omega_2 &= C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t}, \\
 \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} + j^2 \Omega_3 &= C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t}, \\
 \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} + j^2 \Omega_4 &= C_4 \frac{\partial T_4}{\partial t}, \\
 \lambda_5 \frac{\partial^2 T_5}{\partial x^2} + \lambda_5 \frac{\partial^2 T_5}{\partial y^2} + j^2 \Omega_5 &= C_5 \frac{\partial T_5}{\partial t},
 \end{aligned} \tag{1}$$

де λ_i – коефіцієнт теплопровідності, Ω_i – питомий електричний опір, j – густина електричного струму, C_i – об'ємна теплоємність, T_i – температура, $i=1, \dots, 5$, t – час.

Початкові, граничні умови й умови спряження такі:

$$\begin{aligned}
 T_{1,2,3,4,5} &= T_{cp} \text{ при } t = 0, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \beta_{tc} (T_1 - T_{tc}) \text{ при } x = 0, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + \alpha_{12} j T_2 \text{ при } x = h_1, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - \alpha_{23} j T_2 &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \text{ при } x = h_2, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} - \alpha_{34} j T_4 \text{ при } x = h_3, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} + \alpha_{45} j T_4 &= \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} \text{ при } x = h_4, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} &= \beta_{tc} (T_5 - T_{tc}) \text{ при } x = h_5, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \beta (T_1 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ і } \ell, 0 \leq x \leq h_1, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} &= \beta (T_2 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ і } \ell, h_1 < x \leq h_2, \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= \beta (T_3 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ і } \ell, h_2 < x \leq h_3, \\
 \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} &= \beta (T_4 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ і } \ell, h_3 < x \leq h_4, \\
 \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y} &= \beta (T_5 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ і } \ell, h_4 < x \leq h_5,
 \end{aligned} \tag{2}$$

де T_{cp} – температура навколишнього середовища, α – коефіцієнт термо-ЕРС, β – коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем, β_{tc} – коефіцієнт теплообміну із системою тепловідводу, T_{tc} – температура системи тепловідводу.

Для розв'язку системи рівнянь (1) з відповідними початковими й граничними умовами (2) використано метод кінцевих елементів.

На рис. 3, 4 наводяться відповідно двомірне температурне поле шаруватого ТЕ, а також розподіл густини теплового потоку після виходу його на стаціонарний режим роботи. Як вихідні дані використовувалися: $\lambda_1=\lambda_3=\lambda_5=395$ Вт/(м·К), $\lambda_2=\lambda_4=1,5$ Вт/(м·К), $\rho_1=\rho_3=\rho_5=0.0172 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\rho_2=\rho_4=10.65 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $C_1=C_3=C_5=383$ Дж/(кг·К), $C_2=C_4=123$ Дж/(кг·К), $T_{cp}=293$ К, $T_0=291$ К, $\alpha=0.2 \cdot 10^{-3}$ В/К, $\beta=10$ Вт/(м²·К), $T_{tc}=291$ К, $\beta_{tc}=70$ Вт/(м²·К).

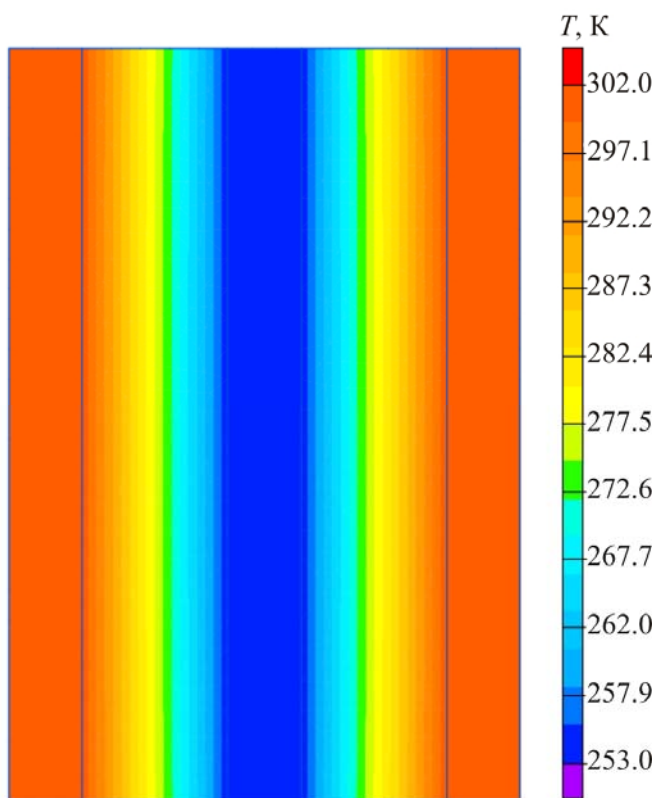


Рис. 3. Температурне поле шаруватого ТЕ.

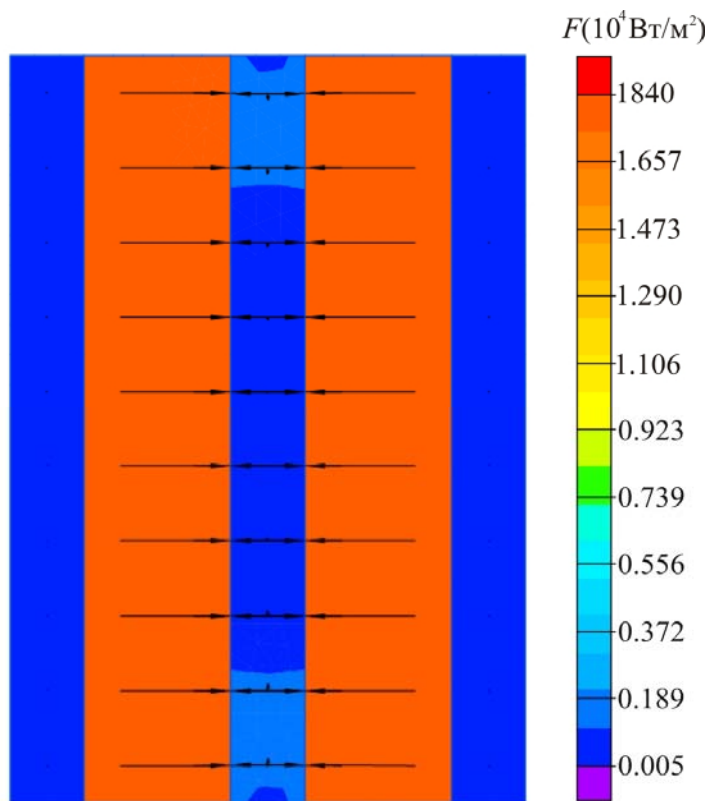


Рис. 4. Картина розподілу теплових потоків у шаруватому ТЕ.

Величина теплового потоку визначалася зі співвідношення

$$F_{xi} = \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x}, F_{yi} = \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y},$$

де $i=1, \dots, 5$.

На рис. 5-6 показано відповідно розподіл температури ТЕ вздовж його поздовжньої осі за різної величини струму живлення, а також зміна у часі температури в різних точках шаруватого ТЕ.

Як видно із отриманих даних, з використанням ТЕ в шаруватому виконанні можна одержати значний перепад температур між холодною та гарячою комутаційною пластиною за значної величини теплового потоку. Так, з перепадом температур між комутаційними пластинами в 47 К тепловий потік на холодному спаї ТЕ пропорційний його холодопродуктивності, становить десь 18000 Вт/м², що відповідає, за даної геометрії ТЕ, струму живлення в 140 А. Зі зменшенням величини електричного струму живлення значення теплового потоку на холодному спаї ТЕ та перепад температур між його спаями також зменшуються. При цьому зниження струму живлення ТЕ з 140 А до 80 А зменшує перепад температур між спаями ТЕ з 47 К до 31 К, відповідно тепловий потік на холодному спаї зменшується з 18000 Вт/м² до 12000 Вт/м².

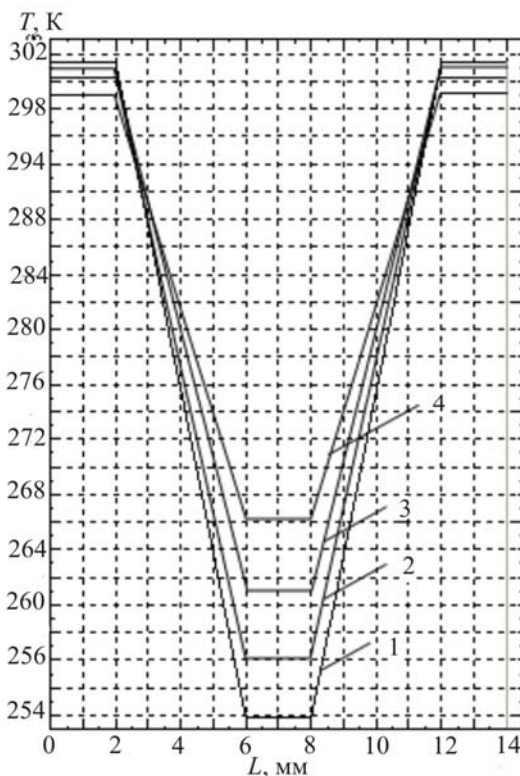


Рис.5. Розподіл температури ТЕ вздовж поздовжньої осі шаруватого ТЕ за різної величини струму живлення: 1 – 140, 2 – 120, 3 – 100, 4 – 80 А.

На рис. 6 наведено дані про зміну температури холодної й гарячої комутаційних пластин, а також різних точок вітки ТЕ у часі, за струму живлення 140 А. Згідно з наведеними даними, температура в зазначених точках виходить на усталений режим приблизно через 900 с. Ця обставина пов'язана з більш значними габаритними розмірами ТЕ. За товщини комутаційних пластин 2 мм і висоти віток ТЕ 4 мм площа поперечного перерізу дорівнює $400 \cdot 10^{-6}$ м². При цьому, як випливає із розрахункових даних, доцільним буде передбачити знімання теплоти не тільки з гарячих комутаційних пластин, але й також із прилеглої до них поверхні віток ТЕ.

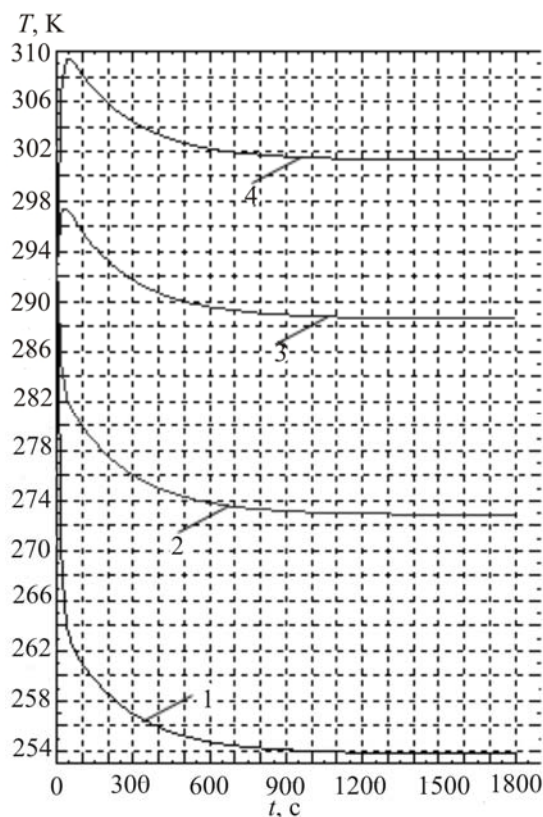


Рис. 6. Зміна температури в різних точках шаруватого ТЕ вздовж повздожньої осі у часі:
1 – холодна комутаційна пластина, 2 – вітка ТЕ на відстані 1.5 мм від холодної комутаційної
пластини, 3 – вітка ТЕ на відстані 1.5 мм від гарячої комутаційної пластини, 4 – гаряча
комутаційна пластина.

У даному конструктивному виконанні може бути запропонований додатковий тепловідвід, приблизно з 1/3 бічної поверхні ТЕ.

Модельовання термомеханічних процесів у ТЕ шаруватих конструкцій.

Для оцінки термомеханічних характеристик ТЕ шаруваті конструкції було виконано розрахунки виникаючих у ньому механічних напружень і деформацій, що є наслідком теплового розширення матеріалів.

Співвідношення між механічними напруженнями $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ і деформаціями ϵ_x й ϵ_y мають вигляд (співвідношення Дюгамеля-Неймана)

$$\epsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) + \gamma T,$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) + \gamma T,$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy},$$

де E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона, γ – коефіцієнт лінійного розширення, індекси x, y, xy визначають напрямки дій величин, при цьому індекс xy означає дію величин по діагоналі.

Деформація ε_z визначається за допомогою ε_x й ε_y за формулою

$$\varepsilon_z = \frac{\nu}{\nu-1}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1+\nu}{1-\nu}\gamma T.$$

Під час розв'язання плоского завдання термопружності в напруженнях як невідомі обираються величини σ_x, σ_y і τ_{xy} .

У випадку плоского напруженого стану можна записати

$$\nabla^2(\sigma_x + \sigma_y) + E\gamma\nabla^2 T = 0.$$

Частинний розв'язок завдання термопружності має вигляд:

$$\sigma_x^{(T)} = -2G \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}, \sigma_y^{(T)} = -2G \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}, \tau_{xy}^{(T)} = 2G \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}, \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Для випадку плоского напруженого стану маємо

$$\nabla^2 \Phi = (1+\nu)\alpha T, \quad (4)$$

де Φ – термопружний потенціал переміщень.

Для стаціонарних температурних полів

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0,$$

тому, застосувавши оператор ∇^2 до рівняння (4), можна одержати

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi = \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial y^4} = 0. \quad (5)$$

Таким чином, якщо з рівняння (5) визначити термопружний потенціал переміщень Φ , то напруження знаходять простим диференціюванням відповідно до формули (3).

У зв'язку з тим, що пружний потенціал переміщень дає лише частинний розв'язок, отримані з його допомогою напруження (3), у загальному випадку, не будуть задовольняти однорідним граничним умовам.

Отже, щоб границя була вільною від зовнішніх впливів, треба накласти такий розв'язок рівнянь теорії пружності, який на поверхні тіла буде давати значення напружень, рівних за величиною та протилежних за знаком тим, які впливають із рівності (3).

Розв'язок такого завдання можна знайти через функцію напружень Ейрі за формулами:

$$\sigma_x^{(P)} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}, \sigma_y^{(P)} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \tau_{xy}^{(P)} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}, \quad (6)$$

де φ – бігармонічна функція.

Остаточний розв'язок термопружного завдання може бути отриманий підсумовуванням виразів (3) і (6)

$$\sigma_x = \sigma_x^{(T)} + \sigma_x^{(P)} = \frac{\partial^2 (\varphi - 2G\Phi)}{\partial y^2},$$

$$\sigma_y = \sigma_y^{(T)} + \sigma_y^{(P)} = \frac{\partial^2 (\varphi - 2G\Phi)}{\partial x^2},$$

$$\tau_{xy} = \tau_{xy}^{(T)} + \tau_{xy}^{(P)} = \frac{\partial^2 (2G\Phi - \varphi)}{\partial x \partial y}.$$

Ввівши функцію напружень Ейрі, пов'язану з напруженнями $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ формулами, аналогічними (6), і підставивши їх у (5), одержимо

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi + E\alpha \nabla^2 T = 0.$$

Загальний розв'язок даного рівняння можна подати у вигляді

$$\varphi = \varphi^{(P)} + \varphi^{(T)},$$

де $\varphi^{(P)}$ – загальний розв'язок бігармонічного рівняння

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi^{(P)} = 0,$$

а $\varphi^{(T)}$ – частинний розв'язок рівняння

$$\nabla^2 \varphi^{(T)} + E\alpha \nabla^2 T = 0.$$

Розв'язок рівнянь термопружності разом із граничними умовами, що визначають наявність по всіх гранях системи нульового нормального тиску, розподіл температури, який визначається при розв'язанні рівнянь (1)-(2), дає можливість одержати двомірну картину механічних напружень, деформацій і переміщень.

Результати обчислень наведено на рис. 7-8. Розрахунки виконано за наступних вихідних даних: $E=1.2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, $\nu=0.3$ $\gamma=22.2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$ для термоелектричного матеріалу та $E=1.2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $\nu=0.34$ $\gamma=16.8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$ для мідних комутаційних пластин [15]. Межа міцності термоелектричного матеріалу становить $1.0 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$, комутаційних пластин – $3.2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$.

На рис.7 показано двомірне поле механічних напружень для шаруватого ТЕ за струму живлення 120 А, що відповідає величині теплового потоку 16000 Вт/м^2 .

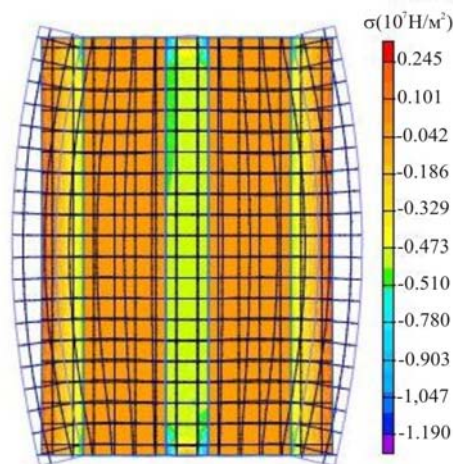


Рис. 7. Картина розподілу механічних напружень у шаруватому ТЕ.

Як впливає із наведених даних для зазначеного конструктивного виконання ТЕ, величина механічних напружень не виходить за допустимі значення. Найбільше навантаження припадає на місця контакту комутаційних пластин з вітками ТЕ. Тут величина механічного навантаження досягає значення $0.9 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ для комутаційної пластини. Найбільші механічні напруження в термоелектричній речовині не перевищують $0.2 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$. На рис. 7 також відображено деформовану границю ТЕ. Із рисунка видно, що у випадку шаруватої конструкції ТЕ деформації відносно незначні й пов'язані, насамперед, з подовженням і розширенням ТЕ з боків, що пояснюється відсутністю його твердої фіксації по краях. При цьому максимальна величина переміщень згідно з розрахунковими даними не перевищує 0.18 мм.

Для порівняння на рис. 8 розглянуто картину механічних напружень за тих самих умов для класичного П-подібного ТЕ.

У цьому випадку деформації досить значні, і за величини струму живлення 120 А, без застосування спеціальних заходів щодо зниження термомеханічних навантажень, механічні зусилля перевищують відповідну межу міцності матеріалу. Наприклад, для комутаційних пластин у дотик з вітками ТЕ значення механічних напружень понад $7 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$, що більш ніж удвічі перевищує величину межі міцності міді, для термоелектричного матеріалу співвідношення механічних навантажень і межі міцності в цьому випадку ще вище.

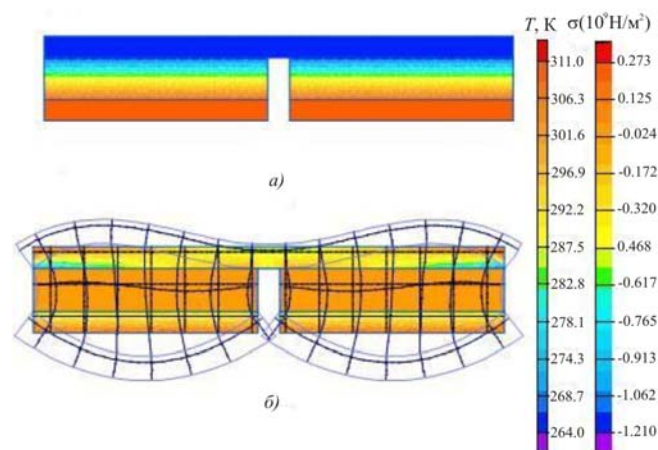


Рис. 8. Температурне поле (а) та поле механічних напружень (б) класичної П-подібної конструкції ТЕ.

При цьому відповідно до проведених розрахунків встановлено, що для даної конструкції ТЕ найбільшим струмом живлення, без перевищення допустимого значення механічних навантажень у системі, є електричний струм, що не перевищує величини 82 А, тобто майже в 1.7 раза менший, ніж у випадку використання шаруватого ТЕ, для якого максимальна величина струму живлення за розрахунками становить 140 А.

Висновки.

На основі проведених досліджень можуть бути зроблені такі висновки:

1. При проектуванні відносно потужних малогабаритних холодильних систем на основі ТЕБ виникають складності в забезпеченні їх надійності роботи. При цьому у випадку використання слабкострумівих ТЕБ на надійність впливає велика кількість ТЕ, а у випадку потужнострумівих ТЕБ – наявність істотних термомеханічних напружень.
2. Для зменшення величини термомеханічних напружень і деформацій у потужнострумівих ТЕБ

доцільним є їх конструктивне виконання у вигляді шаруватої структури, у якій напрямок електричного струму й теплового потоку збігаються.

3. Моделювання шаруватого ТЕ містить у собі розрахунки його температурного поля та, на їх основі визначення відповідних термомеханічних характеристик. При цьому розрахунки температурного поля шаруватого ТЕ зроблено на основі розв'язку нестационарного рівняння теплопровідності для багат шарової системи, а визначення механічних напружень і деформацій здійснене відповідно при розв'язку рівнянь рівноваги, площинності та Дюгамеля-Неймана чисельним методом кінцевих елементів.
4. Результати теоретичних досліджень для шаруватого термоелемента показали його безсумнівні переваги перед класичним П-подібним за його термомеханічними характеристиками за більших струмів живлення.

Література

1. Анатичук Л.И. Термоэлектричество. Термоэлектрические преобразователи энергии. / Л.И. Анатичук // – Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003.
2. Анатичук Л.И. Элементная база термоэлектричества / Л.И. Анатичук // Доклады IX Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». – Санкт-Петербург, 2004.
3. Анатичук Л.И. До питання про фізичні моделі термоелементів / Л.И. Анатичук // Термоелектрика. – 2003, №1. – С.7-23.
4. Поздняков Б.С. Термоэлектрическая энергетика. / Б.С. Поздняков, Е.А. Коктейлев // – М.: Атомиздат, 1974.
5. Малкович Б.Е.-Ш. Термоэлектрические модули на основе сплавов теллурида висмута / Б.Е.-Ш. Малкович // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург, 2008.
6. Патент РФ № 2280919. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., 2006.
7. Патент РФ № 2280920. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., 2006.
8. Патент РФ № 2280921. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., 2006.
9. Патент РФ № 2270495. Способ обеспечения функционирования термоэлектрической батареи / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., 2006.
10. Патент РФ №2335036. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2008.
11. Патент РФ № 2357330. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., 2009.
12. Патент РФ № 2380787. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2010.
13. Патент РФ № 2379790. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2010.
14. Патент РФ № 2417484. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2011.
15. Воронин А.И. К вопросу о механической прочности ветвей термоэлементов на основе Bi_2Te_3 / А.И. Воронин, А.С. Осилков, Е.А. Горбатовская // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург, 2008.

Надійшла до редакції 14.04.2015