

ДЕФОРМАЦІЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ПІД ЧАС ПРОХОДЖЕННЯ ЧЕРЕЗ НЬОГО СТРУМУ

А. В. Соловійова, С. В. Бобженко, П. С. Крохін
(НПФ «Модуль», Київ, Україна)

- Досліджено напрямки й величини деформації поверхонь термоелектричного модуля за різних значень струму, що проходить через нього. Керамічні поверхні термоелектричного модуля під час проходження струму набувають форми еліптичного параболоїда, що призводить до росту механічних напруг зсуву у спаях термоелектричних елементів зі збільшенням координати елемента щодо геометричного центра модуля. Встановлено, що залежність величини деформації поверхонь термоелектричних модулів є лінійною функцією від величини струму.

Вступ

Під час експлуатації термоелектричні охолоджувальні модулі (ТЕМ) постійно перебувають в умовах змінних теплових режимів. Різниця температур на модулі впливає на компоненти, що входять у його конструкцію. При цьому виникають статичні й динамічні механічні напруги. Циклічні теплові, а значить, і механічні впливи на конструкційні елементи модуля, відповідно стиск, розширення й вигин, можуть викликати напруги, що перевищують за значенням межі міцності матеріалів, що входять у модуль. Утома матеріалів через циклічні механічні впливи – причина руйнування їх.

У науково-технічній літературі розглядаються деформації пари елементів електронної і діркової провідності, що входять у модуль, і пропонуються методи зниження впливу механічних напруг на спай шляхом використання різних конструкцій з'єднання напівпровідникового матеріалу з мідними шинами [1]. Теоретична модель і практичні результати досліджень напруг у термоелементі модуля наведено в роботі [2]. Однак у ній не розглянуто вплив координати елемента у модулі на напругу зсуву або вигину елемента. Тому її практичне застосування породжує труднощі через те, що реальна конструкція ТЕМ – складний «сандвіч» матеріалів з різними тепловими й механічними властивостями.

Експериментальних даних, які б описували залежності характеру деформації ТЕМ від різниці температур на модулі, у літературі немає. Тому викликає інтерес дослідження деформації модулів у робочому стані для прогнозування їхньої надійності.

Мета цієї роботи – дослідження напрямку й величини деформації ТЕМ за різних значень струму.

Методика вимірів

Для досліджень було використано термоелектричні модулі, виготовлені НПФ «Модуль», МТ2-1.6-127е (розміром $40 \times 40 \times 4.0$ мм³, висотою елемента 1.6 мм і переріз 2 мм², кількість пар елементів 127; модулі герметизовані епоксидною смолою по периметру).

Модулі встановлені на плоский тепловідвід, яким був предметний столик мікрометричного індикатора годинникового типу ІЧ 0-10. Похибка вимірювання зсувів ± 1.0 мкм. Через модулі пропускався струм у прямому напрямку (1.2; 1.7; 2.5 А), в результаті чого вільна поверхня модуля охолоджувалася, і у зворотному (0.8 А), за якого вільна поверхня нагрівалася.

Поле деформації модуля вимірювали у 25-ти точках, рівномірно розподілених по поверхні керамічної пластини модуля. Під час проходження струму через модуль вимірювали температуру на поверхні модуля у його геометричному центрі термопарою хромель-копель.

Результати дослідження

Результати вимірів величини деформації наведені на рисунках 1 – 5.

За відсутності струму через ТЕМ його керамічна пластина мала неплоскостність 10^{-2} мм (рис. 1), при цьому температура цієї кераміки була 16°C .

Для наочності, праворуч на рис. 1 – 5 наведено колірну шкалу величини деформації.

Графіки полів деформації будували за величинами різниць між деформацією поверхонь ТЕМ, вимірюваною під час проходження через нього струму, і між деформацією ТЕМ за відсутності струму (рис. 1).

На рис. 2 – 5 наведено значення поверхонь полів деформацій модулів і проекції ліній рівних деформацій на координатну площину X - Y .

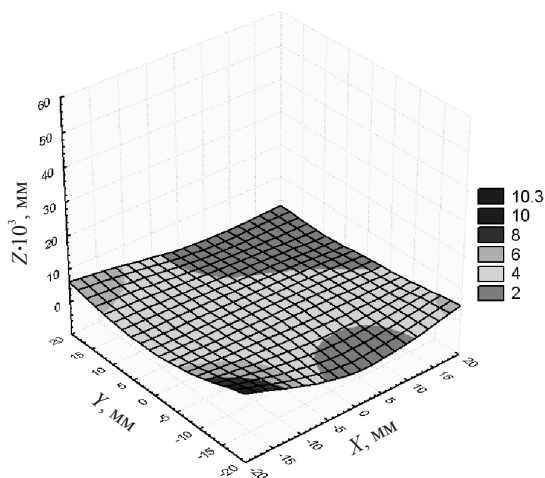


Рис. 1. Форма поверхні ТЕМ за струму, рівного нулю

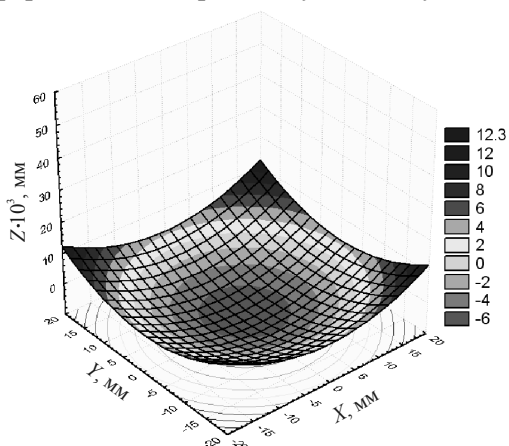


Рис. 2. Графік поля деформації поверхні ТЕМ під час охолодження, ($I=1.2\text{ A}$).
 $Z = 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot (X^2 + Y^2 - 0.3)$.

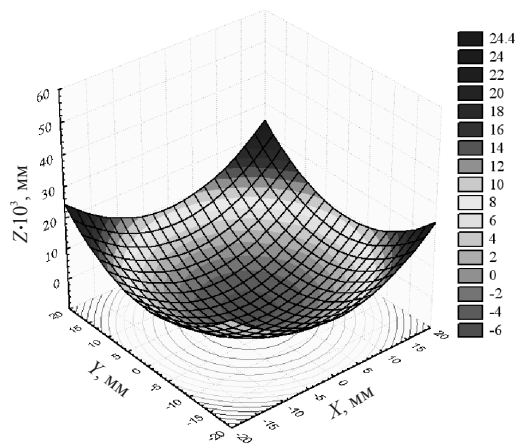


Рис. 3. Графік поля деформації поверхні ТЕМ під час охолодження, ($I=1.7\text{ A}$).
 $Z = 4 \cdot 10^{-5} \cdot (X^2 + Y^2 - 0.17)$.

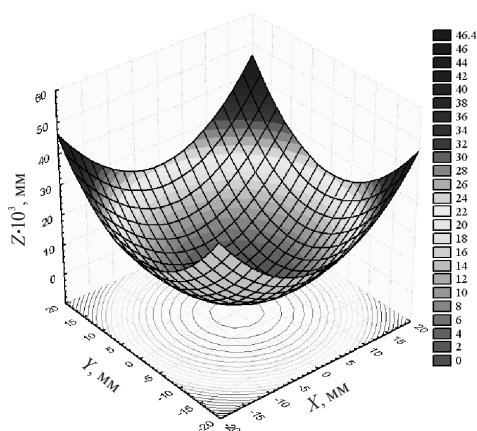


Рис. 4. Графік поля деформації поверхні ТЕМ під час охолодження, ($I=2.5\text{ A}$).
 $Z = 6 \cdot 10^{-5} \cdot (X^2 + Y^2 - 2 \cdot 10^{-2})$.

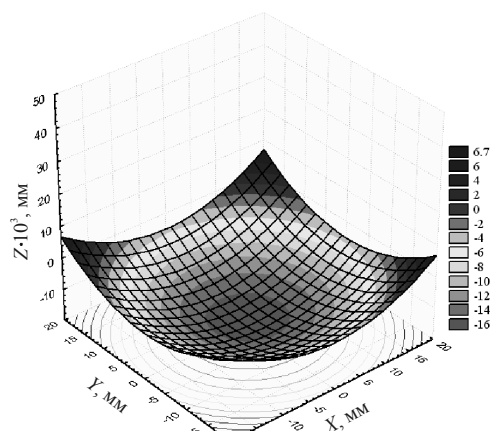


Рис. 5. Графік поля деформації поверхні ТЕМ під час нагрівання, ($I=0.8\text{ A}$).
 $Z = 3 \cdot 10^{-5} \cdot (X^2 + Y^2 - 0.58)$.

Рівняння поверхонь полів деформацій ТЕМ отримані із використанням методу найменших квадратів. Поверхні деформацій добре описуються рівняннями другого порядку, а саме еліптичними параболоїдами $Z=A \cdot (X^2+Y^2)-B$. Коефіцієнт пропорційності A у рівнянні залежить від величини струму (у режимі охолодження) (рис. 6).

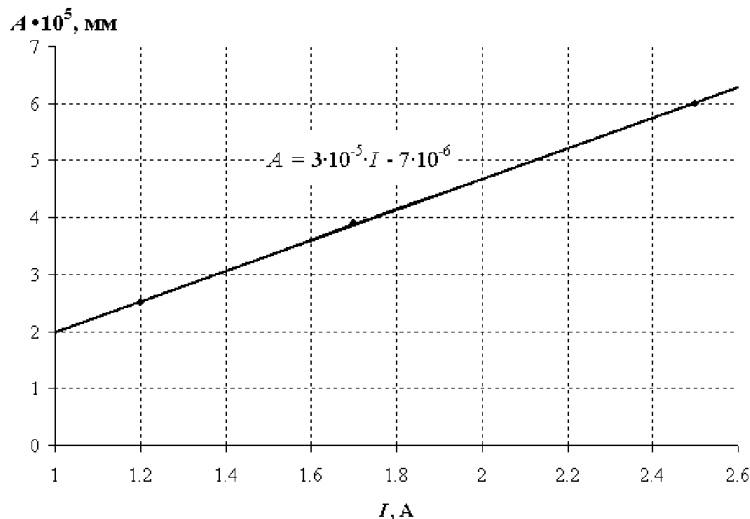


Рис. 6. Залежність коефіцієнта пропорційності у рівнянні параболоїда від струму, що проходить через ТЕМ.

Обговорення результатів

Під час проходження струму через ТЕМ одна з його поверхонь охолоджується, а інша нагрівається. У нашому досліді ми не могли одночасно спостерігати деформацію гарячої й холодної поверхонь, бо одна з них знаходилася на тепловідводі. Тому, розглядаючи деформації однієї з поверхонь у режимі охолодження й у режимі нагріву, ми змоделивали відносну зміну поля деформації холодної й гарячої граней і розмістили їх у спільній системі координат. На рис. 7 побудовані лінії перерізу полів деформації того самого модуля із координатною площиною $X=18.8$ за струмів $I=2.5$ А (холодна грань), $I=0.8$ А (гаряча грань).

Із отриманих результатів видно, що зсув елементів у кутах модуля найбільший (рис. 2–5). Для визначення зсуву елементів у кутах модуля були побудовані дотичні до кривих перерізу полів деформації й визначені їхні кути нахилу ϕ_1 , ϕ_2 (рис. 7).

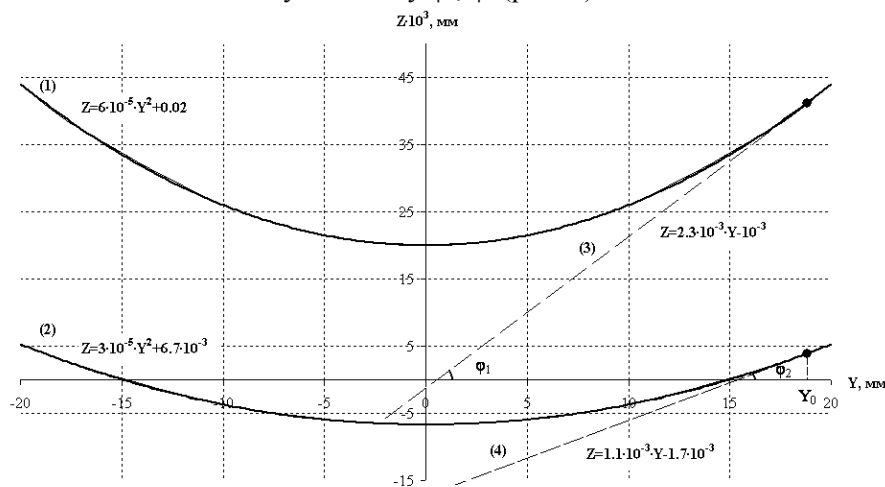


Рис. 7. Криві перерізу поверхонь деформації за $I=2.5$ А і $I=0.8$ А.
 1 – охолодження ($I=2.5$ А), 2 – нагрівання ($I=0.8$ А), 3 і 4 – дотичні у точці $Y=Y_0$.

Абсолютна деформація елемента висотою 1.6 мм відносно холодного боку дорівнює $l_1=3.68 \cdot 10^{-3}$ мм, а відносно гарячого боку – $l_2=1.8 \cdot 10^{-3}$ мм.

Оскільки напрямки деформації для обох граней збігаються, то деформація елемента являє собою різницю деформацій і дорівнює $1.9 \cdot 10^{-3}$ мм. Відносна складова зсуву деформації елемента становить близько 0.1%. За циклічної роботи модуля у режимі «ввімкнено»-«вимкнено» така величина деформації може виявитися критичною й призвести до руйнування спаю або елемента.

Для кривих перерізу параболоїда (рис. 7) множник A при квадратичному члені лінійно залежить від струму (рис. 6), що, власне, і є простим підтвердженням того, що деформація модуля викликана термічними розширеннями його конструкційних елементів. За наявності різниці температур на модулі обидві грані (холодна і гаряча) мають різну деформацію, тому що подовження твердих тіл пропорційне різниці температур $\Delta l=(l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T)$, де l_0 – довжина за $\Delta T=0$, α – коефіцієнт термічного розширення, ΔT – різниця температур.

Елементи модуля приєднані до «холодної» і «гарячої» керамічних пластин у перпендикулярному напрямку (рис. 8).

У процесі деформації модуля в елементі виникають напруги за рахунок його вигину й напруг зсуву елементів у місцях з'єднань з керамікою. Кут між перпендикулярами у точках з'єднання елементів із керамікою (рис. 8) і буде мірою деформації вигину елемента або мірою напруг зсуву. Цей кут дорівнює куту між дотичними до лінії вигину кераміки у цих точках. Оскільки деформаційні поверхні – параболоїди, то похідні у точках їхніх перерізів – лінійні функції від координати Y_0 . Тому напрямок вигину лінійно наростає від центра модуля до його периферії. А отже, модулі малих розмірів надійніші.

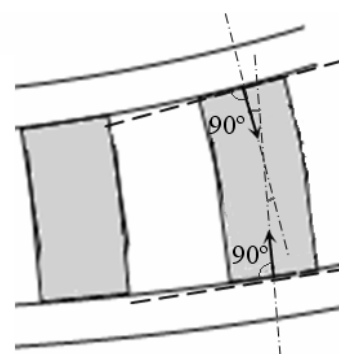


Рис. 8.

Висновки

1. Проведено дослідження поля деформації ТЕМ у різних теплових режимах роботи.
2. Деформована поверхня квадратного ТЕМ являє собою еліптичний параболоїд.
3. Деформація на спаї елементів залежить від координати елемента у модулі й збільшується з її зростанням відносно геометричного центра модуля.

Література

1. Коленко Е.А. Термоэлектрические охлаждающие приборы. – Л.: Наука, 1967. – 291 с.
2. Ащеулов А.А., Маньк О.Н. Исследование термоупругих свойств ветвей термоэлектрических модулей Пельтье // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005.– №3. – С.26 – 29.

Надійшла до редакції 10.02.09.