

Горський П.В., док. фіз.-мат. наук^{1,2}

¹ Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

² Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна
e-mail: gena.grim@gmail.com



Горський П.В.

ДЕМПФУВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

На основі поєднання методів опору матеріалів з підходом Вейбулла, визначено вимоги до коефіцієнтів жорсткості демпфуючих елементів, які можна використати для зниження термомеханічних напружень у термоелектричних гілках з метою підвищення циклічної стійкості термоелектричних перетворювачів енергії. Обґрунтовано степеневу модель Коффіна-Менсона для залежності фактору прискорення за наявності циклічних температурних впливів від перепаду температури. Результати розрахунків знаходяться не лише у якісній, а й у задовільній кількісній згоді з експериментальними даними.

Ключові слова: циклічна стійкість, термоелектричний перетворювач енергії, термомеханічні напруження, демпфування, опір матеріалів, підхід Вейбулла, міцність на розтріскування, жорсткість пружного елемента.

Вступ

Необхідність демпфування термомеханічних напружень впливає з того, що у разі жорсткого кріплення термоелектричних гілок до керамічних пластин за наявності циклічних температурних впливів у термоелектричних гілках виникають термомеханічні напруження, які істотно перевищують їх тріщиностійкість і істотно знижують ймовірність безвідмовної роботи термоелектричних перетворювачів енергії [1]. Метою статті є визначення вимог до жорсткості демпфуючих елементів з метою отримання прийнятних з точки зору циклічної стійкості та ймовірності безвідмовної роботи термоелектричних перетворювачів енергії механічних напружень у термоелектричних гілках.

1. Фізична модель демпфування термомеханічних напружень і наслідки з неї

Фізичну модель демпфування термомеханічних напружень зображено на рис. 1.

Для визначення вимог до коефіцієнта жорсткості пружного елемента уявимо собі, що термоелектрична гілка розширюється частково вільно. Її температурна деформація на величину x зумовлює силу реакції kx з боку пружного елемента. Цій силі реакції відповідає механічне напруження kx/b^2 , де b сторона поперечного перерізу гілки. З умови механічної рівноваги впливає таке рівняння для визначення x :

$$E \left(\alpha^T \Delta T - \frac{x}{l} \right) = \frac{kx}{b^2}. \quad (1)$$

де E – модуль Юнга термоелектричного матеріалу, α_T – коефіцієнт його лінійного розширення, ΔT – перепад температури на термоелектричній гілці, l – її довжина.

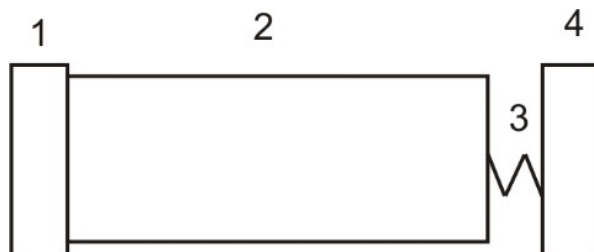


Рис. 1. Фізична модель демпфування термоелектричної гілки по гарячій стороні. 1 – жорстко закріплена кераміка з холодної сторони, 2 – термоелектрична гілка з антидифузійними шарами і комутацією, 3 – пружний елемент; 4 – кераміка з гарячої сторони.

Розв'язуючи (1) і враховуючи узагальнений закон Гука, знайдемо наступний вираз для залишкового механічного напруження, яке зумовлює розтріскування термоелектричної гілки за наявності демпфуючого елемента

$$\sigma_f = \frac{kEl\alpha^T \Delta T}{(Eb^2 + kl)(1 - \nu)} \quad (2)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона термоелектричного матеріалу.

Зрозуміло, що якщо пружний елемент є ідеально піддатливим, то $k = 0$, розширення є вільним і, отже, руйнуючі напруження відсутні, а якщо ми маємо ідеально жорстке закріплення, то $k \rightarrow \infty$ і ми отримуємо традиційну формулу для руйнуючого напруження розтріскування при термомеханічних навантаженнях.

Саме це напруження слід підставляти у розподіл Вейбулла при розрахунку імовірності безвідмовної роботи термоелектричного генераторного модуля за наявності циклічних температурних впливів. Враховуючи наявність градієнта температури вздовж гілки і наближено нехтуючи температурною залежністю теплопровідності матеріалу, отримаємо наступний вираз для імовірності безвідмовної роботи модуля за наявності циклічних температурних впливів:

$$P(N_c) = \exp \left\{ -\frac{2N_c N_L b^2 l}{m+1} \left(\frac{kEl\alpha^T \Delta T}{(Eb^2 + kl)(1 - \nu)\sigma_0} \right)^m \right\}, \quad (3)$$

де N_c – кількість циклів нагрівання-охолодження, N_L – кількість гілок у модулі, m та σ_0 – параметри Вейбулла термоелектричного матеріалу. А з формули (3) можна визначити такі показники надійності, як середню циклічну стійкість і γ – відсотковий ресурс циклічної стійкості. Результати цих розрахунків наведено на рис. 2, 3.

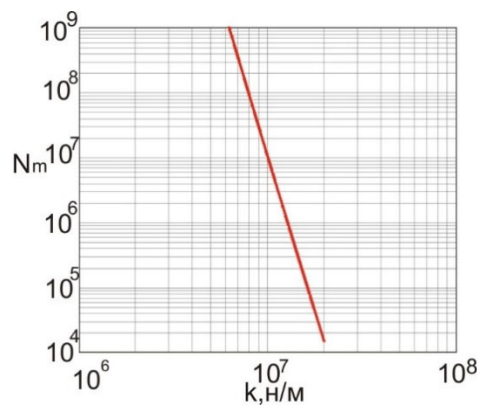


Рис. 2. Прогнозована залежність середньої циклічної стійкості термоелектричних генераторних модулів від коефіцієнта жорсткості пружного елемента.

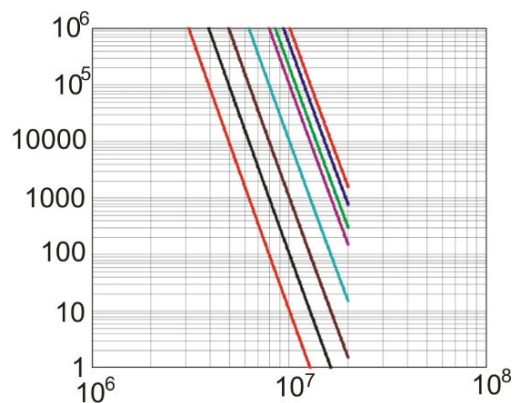


Рис. 3. Прогнозована залежність гамма-відсоткової циклічної стійкості термоелектричних генераторних модулів від коефіцієнта жорсткості пружного елемента у Н/м. Прямі зліва направо відповідають значенням γ , рівним 0.999999, 0.99999, 0.9999, 0.999, 0.99, 0.98, 0.95, 0.9.

На практиці релаксації напруг домагаються або належним вибором припоїв [2], або ж встановленням спеціальних прокладок між керамікою та мідною комутацією [1].

З рисунків видно, що по мірі переходу від абсолютно жорсткого закріплення термоелектричних гілок до закріплення нехай і дуже великої але скінченої жорсткості прогнозована циклічна стійкість термоелектричних перетворювачів енергії дуже стрімко зростає. Це стрімке зростання перш за все зумовлене великим значенням параметру форми m .

Але такий на перший погляд обнадійливий результат перебуває у кардинальній суперечності з підходами, які сформувались і є загальноприйнятими у рамках дисциплін «Опір матеріалів» і «Структурна механіка». Для цих дисциплін ключовою характеристикою матеріалу є його гранична міцність. А ймовірнісний підхід Вейбулла такої характеристики не передбачає. Тому у його рамках навіть за як завгодно великих термомеханічних напружень зберігається нехай і дуже мала, але істотно відмінна від нуля ймовірність збереження цілісності термоелектричної гілки. Але з основних засад опору матеріалів і структурної механіки випливає, що незалежно від показника циклічної стійкості «прийнятний» коефіцієнт жорсткості демпфуючого елемента повинен визначатись лише вимогою, щоб демпфовані термомеханічні напруження не перевищували мінімальної міцності σ_f термоелектричної гілки на розтріскування. А вона у відповідності з теорією Грифітса визначається так [3]:

$$\sigma_f = \frac{K_c}{\sqrt{\pi l}}, \quad (4)$$

де K_c – так звана навантажувальна здатність матеріалу термоелектричної гілки», l – довжина термоелектричної гілки вздовж градієнта температури. Але в такому разі виходить, що, наприклад, коефіцієнт жорсткості демпфуючого елемента для термоелектричної гілки на основі телуриду вісмуту у формі куба з ребром 5 мм за перепаду температур 150 °С не повинен перевищувати $1.17 \cdot 10^7$ Н/м. А це хоч і відповідає попереднім ймовірнісним оцінкам, ще не створює запасу міцності за тріщиностійкістю. Рекомендацій щодо запасу міцності у [3] для цього випадку немає. Так, наприклад, для запасу міцності рівного 1.5 потрібне значення коефіцієнту жорсткості не більше $7.636 \cdot 10^6$ Н/м, а для 10-кратного запасу міцності потрібне значення коефіцієнту жорсткості не більше $1.106 \cdot 10^6$ Н/м. Для створення особливо великого запасу міцності такий демпфуючий елемент можна виготовити, наприклад, у вигляді мініатюрної пружини з тонкого дроту.

Її коефіцієнт жорсткості у відповідності з [3] дорівнює

$$k = \frac{Ed^4}{16(1+\nu)D^3}, \quad (5)$$

де E та ν – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу пружини D та d – діаметри дроту та витка пружини відповідно. З цієї формули випливає, що прийняте демпфування термомеханічних напружень забезпечує, наприклад, одновиткову пружину з діаметром витка, більшим від діаметру дроту, виготовлена з алюмінієвого дроту діаметром не більше 5.6 мм а демпфування з 10-кратним запасом міцності – з того ж дроту діаметру 3 мм при діаметрі витка 5 мм на жорсткість демпфуючого елемента різко впливає діаметр дроту як правило такі демпфуючі елементи виготовляються з дроту істотно меншого діаметра, тому умова ефективного демпфування виконується добре. А нижня межа діаметру дроту визначається виключно міцністю з'єднання, а, отже, електричного сполучення термоелементів у перетворювачі енергії.

В такому разі можна не дбати про «безпечне» з точки зору механічної стійкості значення теплопровідності, і, отже, термоелектричної добротності та ефективності термоелектричного матеріалу. У такому разі прогнозована циклічна стійкість у відповідності з рис. 2 складе не менше 10^7 циклів.

Якщо з такої ж точки зору оцінювати коефіцієнт жорсткості кераміки, враховуючи її модуль Юнга і товщину, то він виходить рівним $2.7 \cdot 10^9$ Н/м.

Але пружні елементи можна виготовляти також з гуми або полімерів. Іншим способом зниження термомеханічних напружень є оптимізація геометрії термоелектричних гілок, але сама по собі вона все одно не забезпечує такого їх рівня, який би гарантував прийнятну циклічну стійкість генераторних модулів.

На перший погляд спрогнозована нами циклічна стійкість та допустима жорсткість демпфуючих елементів видаються перебільшеними. Але слід враховувати, що у даному випадку розглядається циклічна стійкість відносно руйнування термоелектричних гілок. Однак і без руйнування циклічні температурні впливи можуть змінювати параметри термоелектричного перетворювача енергії внаслідок таких процесів у термоелектричному матеріалі, які впливають на його термоелектричні характеристики. Це питання детально розглядалось у праці [4] для матеріалів на основі *Si-Ge*, Але вказані процеси не є предметом даного дослідження.

Отримані результати принаймні якісно співпадають з результатами праці [5], де показано, що навища прогнозована надійність отримується тоді, коли гарячий кінець термоелектричної гілки не є жорстко закріпленим, але є притиснутим, оскільки притискання веде до додаткової компенсації термомеханічних напружень.

Торкнемось тепер співставлення наших розрахунків і оцінок циклічної стійкості термоелектричних перетворювачів енергії з експериментальними даними інших авторів. У праці [6] виконувались прискорені циклічні випробування термоелектричних охолоджувальних модулів та аналіз їх відмов на цих випробуваннях. Дослідження показали, що залежність відносної кількості відмов від кількості циклів нагріву-охолодження із задовільною точністю описується кривими Вейбула. При цьому параметри форми кривих не залежать від температури і дорівнюють 3.65877, а параметри масштабу за температурних перепадів 70 і 80 К відповідно дорівнюють 2324.91 і 1830.84 відповідно. При цьому наявність температурного перепаду веде до деформації термоелектричних гілок і вигину кераміки. Тому відмови пояснюються розтріскуванням матеріалу внаслідок циклічної дії згинальних деформацій. Імовірність відмов на рівні 10% спостерігається після 1250 циклів за перепаду 70 К і 1000 циклів за перепаду 80 К. У згаданій праці немає вказівок про вжиття виробниками модулів якихось спеціальних заходів для послаблення термомеханічних напружень.

Але у вигляді розподілу Вейбула можна подати і формулу (3):

$$P(N_c) = \exp\left(-\frac{N_c}{N_0}\right). \quad (4)$$

Параметр форми цього розподілу дорівнює 1, а параметр масштабу визначається так:

$$N_0 = \frac{m+1}{2N_L b^2 l} \left(\frac{(Eb^2 + kl)(1-\nu)\sigma_0}{kEl\alpha^T \Delta T} \right)^m. \quad (5)$$

Введемо деяку ефективну температуру активації відмов, пов'язаних з руйнуванням термоелектричних гілок внаслідок розтріскування, яка дорівнюватиме

$$T_{\text{efc}} = \frac{(Eb^2 + kl)(1-\nu)\sigma_0}{kEl\alpha^T} \left(\frac{m+1}{2N_L b^2 l} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (6)$$

Тоді параметр масштабу можна подати так:

$$N_0 = \left(\frac{T_{\text{efc}}}{\Delta T} \right)^m. \quad (7)$$

З такої точки зору уявляється слушним ввести фактор прискорення відмов через величину, обернену до параметру масштабу:

$$Af = \left(\frac{\Delta T}{T_{\text{efc}}} \right)^m \quad (8)$$

Таке представлення відповідає так званій моделі Коффіна-Менсона. У відповідності з загальним визначенням фактору прискорення у цій моделі його можна подати так:

$$AF = \left(\frac{\Delta T_{ALT}}{\Delta T_{nom}} \right)^m \quad (9)$$

де $\Delta T_{ALT}, \Delta T_{nom}$ – температурні перепади під час прискорених випробувань і у номінальному режимі відповідно.

Таким чином виходить, що якщо циклічна стійкість термоелектричних модулів справді визначається процесами повного руйнування термоелектричних гілок внаслідок розтріскування під впливом термомеханічних напружень, то її залежність від перепаду температур повинна прямо характеризувати розподіл Вейбулла, який визначає «відгук» термоелектричного матеріалу на механічне напруження.

Тепер проаналізуємо, якою мірою такий попередній висновок узгоджується з наявними експериментальними даними. У праці [6] отримано значення $m = 1.78914$ в той час, як у відповідності з [7] повинно бути $m = 10$. Тому відмови під час прискорених випробувань на циклічну стійкість в основному не зумовлені пошаровим розтріскуванням термоелектричних гілок в цілому під впливом термомеханічних напружень. Більше того, відмінність параметру форми розподілу Вейбула, отриманого в ході випробувань, від одиниці свідчить про те, що відмови на послідовних циклах не є незалежними. Таким чином спостережувані відмови істотно залежали від «передісторії» модулів, а це означає що має місце поступовий ріст тріщин втомі.

У цьому випадку формулу (5) можна подати так:

$$P(N_c) = \exp \left\{ - \frac{2N_c^\beta N_L b^2 l}{m+1} \left[\frac{kEl\alpha^T \Delta T}{(Eb^2 + kl)(1-\nu)\sigma_0} \right]^m \right\}. \quad (10)$$

Тому з урахуванням процесу росту тріщин параметр масштабу тепер дорівнює:

$$N_0 = \left\{ \frac{m+1}{2N_L b^2 l} \left[\frac{(Eb^2 + kl)(1-\nu)\sigma_0}{kEl\alpha^T \Delta T} \right]^m \right\}^{\frac{1}{\beta}}, \quad (11)$$

і, отже, вираз (9) для фактору прискорення набуває вигляду:

$$AF = \left(\frac{\Delta T_{ALT}}{\Delta T_{nom}} \right)^{\frac{m}{\beta}}. \quad (12)$$

Модулі, які досліджувались у праці [6] містили 254 гілки ця формула відбиває суть моделі Коффіна-Менсона, яка полягає тому, що прискорюючим фактором є перепад температури з'єднаних послідовно. Вважаючи, що дослідження велись без вжиття спеціальних заходів зі зниження термомеханічних напружень, приймаючи розміри гілок рівними $b = 3$ мм, $l = 2$ мм і розглядаючи параметр σ_0 як підганяльний, отримаємо, що досліджувані модулі за перепаду температур 150 К могли б витримати близько 10^6 циклів з імовірністю 0.999, якщо б їм дати можливість майже вільного розширення у гарячий бік, помістивши гілки з цього боку на демпфуючі пружні елементи з коефіцієнтом жорсткості не більше 10^6 Н/м. Відповідний розрахунковий графік циклічної стійкості зображено на рис. 4.

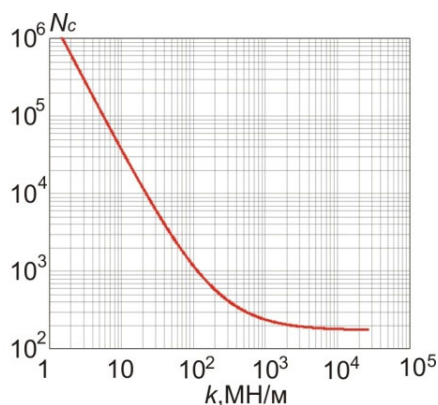


Рис. 4. Прогнозована циклічна стійкість модуля за імовірності безвідмовної роботи рівної 0.999 в залежності від коефіцієнта жорсткості пружного елемента за наявності циклічної втоми.

З порівняння графіків на рис. 3. і 4 видно, що за наявності циклічної втоми вимоги до піддатливості пружного елемента, який демпфує термомеханічні напруження майже у 10 разів зростають. З іншого боку, виходячи з наведеної вище оцінки жорсткості кераміки, зробленої на підставі даних про її модуль Юнга та товщину, можна стверджувати, без додаткового демпфування напружень цей модуль з імовірністю 0.99 витримає лише близько 360 циклів за $\Delta T = 150^\circ\text{C}$. Беручи до уваги фактор прискорення, отримаємо, що за $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ він з тією ж імовірністю повинен би витримати 1120 циклів, але насправді він витримав 550 циклів. Таке співпадання теорії і експерименту можна вважати прийнятним. Порівняння прогнозу з результатами праці [6] дозволяє зробити висновок, що при виготовленні випробуваних модулів спеціальних заходів для демпфування термомеханічних напружень не вживалось. Наведене співставлення теорії з експериментом є лише орієнтовним і якісним, оскільки детальних даних про геометричні параметри модулів і характеристики використаних матеріалів у праці [6] не наведено.

Розходження результатів прогнозування з експериментальними даними може бути обумовлене також наступними чинниками:

1) розподіл Вейбулла отримано емпіричним шляхом, його параметри знаходяться виключно експериментально і він лише наближено описує статистику руйнування і циклічну втому, а ніяких «перших принципів», які б дозволили отримати більш обґрунтовані розподіли, на сьогодні не існує;

2) внаслідок цього степенева модель Коффіна-Менсона для фактору прискорення при циклічних випробуваннях справедлива лише наближено;

3) при розрахунку імовірності безвідмовної роботи модуля в цілому ми припускаємо, що під час випробувань усі гілки перебувають в однакових умовах і виходять з ладу рівномірно і незалежно;

4) внаслідок цього ми розраховуємо імовірність виходу з ладу однієї гілки і тому припускаємо, що на кераміку не діють згинальні напруження і вона працює виключно на чистий стиск;

5) наявність згинальних напружень у кераміці веде до того, що гілки перебувають у неоднакових умовах, і, отже, імовірності їх виходу з ладу різні, внаслідок чого викладена теорія перестає бути коректною, що істотно ускладнює розрахунки, оскільки потребує визначення напружень в усіх гілках, а не лише в одній.

б) традиційна формула для термомеханічного розтріскуючого напруження шаруватого матеріалу у випадку жорсткого закріплення термоелектричної гілки є ідеалізованою.

Аналіз відмов перш за все засвідчив, що попри наявність значних зсувних термомеханічних напружень у гілках їх пошарового розтріскування не відбулось. В той же час згинальні напруження, викликані температурним градієнтом, зумовили концентрацію напружень у найбільш крихких частинах паяних швів і руйнування припою. Довгочасне функціонування модуля у циклічному режимі веде до появи тріщин втоми, які поступово розповсюджуються і на термоелектричний матеріал. Також було виявлено, що розтріскуванню найбільшою мірою сприяють волога і міграція матеріалів

Таким чином ми бачимо, що ключовим засобом підвищення циклічної стійкості термоелектричних перетворювачів енергії повинен стати не лише і не так пошук прихованих резервів у термоелектричних матеріалах, як нівелювання термомеханічних напружень у термоелектричних гілках за рахунок конструктивних удосконалень перетворювачів. Їх розробники доволі часто ідуть саме таким шляхом [7]. Принагідно зауважимо, що у праці [1] було наголошено на важливості демпфування термомеханічних напружень з метою підвищення циклічної стійкості термоелектричних модулів охолодження, але конкретні вимоги до демпфуючих елементів конструкції термоелектричних перетворювачів енергії не визначались.

Висновки

1. Шляхом поєднання підходу опору матеріалів з підходом Вейбула розроблено теорію демпфування термомеханічних напружень у термоелектричних перетворювачах енергії.

2. Встановлено, що циклічна стійкість термоелектричних перетворювачів енергії істотно зростає у міру підвищення піддатливості пружних демпфуючих елементів. Таке зростання зумовлене великим значенням параметру форми Вейбула термоелектричного матеріалу.

3. Встановлено, що належним вибором коефіцієнта жорсткості, зокрема діаметру дроту і діаметру витків пружних демпфуючих елементів у вигляді циліндричних пружин можна домогтись повної компенсації зумовлених температурним градієнтом, напружень розтріскування термоелектричних гілках тим самим різко підвищити циклічну стійкість термоелектричних перетворювачів енергії. Внаслідок цього можна не дбати про «безпечне» з точки зору термомеханічних напружень розтріскування значення теплопровідності, а, отже, і термоелектричної добротності та ефективності термоелектричного матеріалу Пружний елемент можна виготовити, наприклад, у вигляді одновиткової пружини діаметром 5 мм з алюмінієвого дроту діаметром не більше 3 мм. Оскільки на практиці застосовується дріт істотно меншого діаметру, то нижня границя цього діаметру визначається вже не вимогою компенсації термомеханічних напружень, яка гарантовано з істотним запасом виконується, а його значенням, мінімально допустимим з точки зору міцності з'єднання.

4. Результати розрахунків знаходяться не лише у якісній, а й у задовільній кількісній згоді з наявними експериментальними даними.

5. Обґрунтовано степеневу модель Коффіна-Менсона залежності фактору прискорення при циклічних випробуваннях термоелектричних перетворювачів енергії від перепаду температур сфера її застосовності така ж, як і підходу Вейбула, який пов'язує ймовірність збереження цілісності термоелектричної гілки з механічними напруженнями в ній Парвметри Вейбула термоелектричного матеріалу визначаються суто експериментально Модель Коффіна-Менсона з прийнятною точністю виконується на практиці

Література

1. Анатичук Л.І., Балазюк В.М., Лусте О.Я., Малишко В.В., Михальченко В.П. Про підвищення циклічної стійкості термоелектричних модулів охолодження. // Термоелектрика. – 2003. – № 4. – С. 71 – 75.
2. Setty K., Sabbarayan G., Nguyen L. (2005). Power cycling reliability, failure analysis and acceleration factors of Pb-free solder joints. *Proceedings Electronic components and Technology Conference*, P. 907 – 915.
3. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. *Опір матеріалів: підручник* / за ред. Г.С. Писаренка. К.: Вища школа, 2004, 655 с.
4. Сабо Є.П. Механізми, що визначають ресурсні можливості термоелектричних перетворювачів. // Термоелектрика. – 2006. – № 2. – С. 59 – 70.
5. Karri N.K., Mo C. (2018). Reliable thermoelectric module design under opposing requirements from structural and thermoelectric considerations. *Journal of Electronic Materials*, 47, 3127 – 3135.
6. Park W., Barako M.T., Marconnet A.M., Asheghi M., Goodson K.E. (2012). Effect of thermal cycling on commercial thermoelectric modules. *13th IEEE ITherm Conference*. (San Diego, CA, USA, 30 May 2012 – 01 June 2012).
7. Wereszczak A.A., Case E.D. (2015). *Mechanical response of thermoelectric materials*. Oak Ridge, TN: ORNL/TM-2015/227, U.S. Department of Energy.
8. *US Patent No 4011104* (1977). A. Basilius. Thermoelectric system.

Надійшла до редакції: 10.10.2023.

Gorskyi P.V., DSc. (Phys-Math)^{1,2}

¹ Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str.,
Chernivtsi, 58029, Ukraine;

² Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskyi str.,
Chernivtsi, 58012, Ukraine
e-mail: gena.grim@gmail.com

DAMPING OF THERMOMECHANICAL STRESSES AS A MEANS OF INCREASING THE CYCLIC STABILITY OF THERMOELECTRIC ENERGY CONVERTERS

Based on a combination of the strength of materials methods with the Weibull approach, the requirements for the rigidity coefficients of damping elements are determined, which can be used to reduce thermomechanical stresses in thermoelectric legs in order to increase the cyclic stability of thermoelectric energy converters. The Coffin-Manson power model for the dependence of the acceleration factor on the temperature difference in the presence of cyclic temperature effects is substantiated. The calculation results are not only in qualitative but also in satisfactory quantitative agreement with the experimental data.

Key words: cyclic stability, thermoelectric energy converter, thermomechanical stresses, damping, strength of materials, Weibull approach, cracking strength, rigidity of elastic element.

References

1. Anatychuk L.I., Balaziuk V.M., Luste O.J., Malyshko V.V., Mikhalechenko V.P. (2003). On increasing the cyclic stability of thermoelectric cooling modules. *J. Thermoelectricity*, 4, 71 – 75.
2. Setty K., Sabbarayan G., Nguyen L. (2005). Power cycling reliability, failure analysis and acceleration factors of Pb-free solder joints. *Proceedings Electronic components and Technology Conference*, P. 907 – 915.
3. Pisarenko H.S., Kvitka O.L., Umanskyi E.S. (2004). *Strength of materials: manual*. Kyiv: Vyshcha shkola.
4. Sabo E.P. (2006). Mechanisms that determine the resource capabilities of thermoelectric converters. *J. Thermoelectricity*, 2, 59 – 70.
5. Karri N.K., Mo C. (2018). Reliable thermoelectric module design under opposing requirements from structural and thermoelectric considerations. *Journal of Electronic Materials*, 47, 3127 – 3135.
6. Park W., Barako M.T., Marconnet A.M., Asheghi M., Goodson K.E. (2012). Effect of thermal cycling on commercial thermoelectric modules. *13th IEEE ITherm Conference*. (San Diego, CA, USA, 30 May 2012 – 01 June 2012).
7. Wereszczak A.A., Case E.D. (2015). *Mechanical response of thermoelectric materials*. Oak Ridge, TN: ORNL/TM-2015/227, U.S. Department of Energy.
8. *US Patent No 4011104* (1977). A. Basilius. Thermoelectric system.

Submitted: 10.10.2023.