

УДК 537.32

Горський П.В., док. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН та МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;  
e-mail: gena.grim@gmail.com

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,  
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна



Горський П.В.

## ПІДВИЩЕННЯ УДАРОСТІЙКОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

На основі поєднання методів опору матеріалів з підходом Вейбула, досліджено вплив характеру закріплення термоелектричних гілок, у термоелектричному перетворювачі енергії на залежність ймовірності його безвідмовної роботи від величини ударного прискорення і доведено, що це прискорення за заданої ймовірності безвідмовної роботи істотно зростає в 7 разів за заміни жорсткого кріплення термоелектричних гілок до керамічних пластин на еластичне.

**Ключові слова:** ударостійкість, термоелектричний перетворювач енергії, механічні напруження, опір матеріалів, підхід Вейбула, жорстке закріплення, еластичне закріплення.

### Вступ

У реальних умовах застосування важливого значення набуває ударостійкість термоелектричних перетворювачів енергії. Із загальних підходів опору матеріалів [1] випливає, що на руйнуючі напруження у термоелектричних гілках істотно впливає спосіб їх кріплення до керамічних пластин. Тому метою даної статті є дослідження впливу цього способу на ймовірність безвідмовної роботи термоелектричного перетворювача енергії в умовах на нього ударних навантажень. Будемо розглядати термоелектричний перетворювач енергії з суто послідовним електричним сполученням термоелектричних гілок. Відомо, що під час випробувань на ударостійкість ударні навантаження прикладаються по трьох взаємно перпендикулярних осях, дві з яких перпендикулярні до градієнту температури, рівноправні і є найбільш небезпечними, бо саме при прикладанні ударних навантажень у цих напрямках у термоелектричних гілках діють згинальні напруження. Замість розгляду перетворювача енергії в цілому ми розглядатимемо лише одну його гілку. При цьому розглянемо два модельні випадки: абсолютно жорсткого закріплення гілки на обох кінцях і нежорсткого (еластичного) закріплення гілки на обох кінцях

У першому випадку термоелектричну гілку розглядатимемо як балку, абсолютно жорстко закріплену на обох кінцях. Відповідні фізичні моделі зображено на рис. 1.

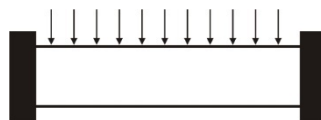


Рис. 1. Жорстке закріплення термоелектричної гілки.

Ударне прискорення  $k_w g$  ( $k_w = w/g$ ) зумовлює рівномірно розподілене по довжині балки ударне навантаження з інтенсивністю  $q = \rho k_w g a^2$ . У кожному з закріплень діють дві опорні реакції – сила і момент. Дана балка є два рази статично невизначеною, оскільки є 4 невідомих реакції і лише 2 рівняння для їх визначення. Але наша фізична модель має вісь симетрії, по якій дану балку можна розрізати і зробити задачу статично визначеною. Тоді розподіл згинальних напружень у половині балки, які ми вважаємо одновісними, визначається так:

$$\sigma(x) = \frac{3k_w g \rho}{a} \left( \frac{l^2}{4} + lx - x^2 \right). \quad (1)$$

де  $x$  – координата, відрахована від закріпленого кінця гілки,  $l$  – її довжина,  $a$  – сторона її квадратного поперечного перерізу,  $\rho$  – густина термоелектричного матеріалу,  $k_w$  – ударне прискорення в одиницях  $g$ . Тому імовірність виходу модуля з ладу в разі однократної дії ударного навантаження визначається так:

$$P(N_L) = \exp \left\{ -2N_L a^2 \int_0^{l/2} \left[ \frac{3k_w g \rho}{a \sigma_0} \left( \frac{l^2}{4} + lx - x^2 \right) \right]^m dx \right\}. \quad (2)$$

Розглянемо тепер другий випадок, коли гілка еластично закріплена на обох кінцях. Тоді її можна наближено вважати закріпленою на двох шарнірно-рухомих опорах. Відповідну фізичну модель зображено на рис. 1, 2.

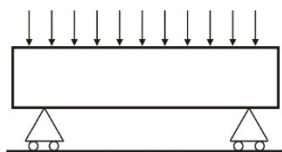


Рис. 2. Еластичне закріплення термоелектричної гілки.

У цій моделі опорні реакції зводяться лише до сил, спрямованих вертикально вгору. Отже, розподіл згинальних напружень у цій моделі визначається так:

$$\sigma(x) = \frac{6k_w g \rho}{a} (lx - x^2). \quad (3)$$

Тому формула (2) набуває вигляду:

$$P(N_L) = \exp \left\{ -2N_L a^2 \int_0^{l/2} \left[ \frac{6k_w g \rho}{a \sigma_0} (lx - x^2) \right]^m dx \right\}. \quad (4)$$

де  $m$  та  $\sigma_0$  параметри Вейбула термоелектричного матеріалу. Зазначимо, що ці параметри визначаються суто експериментально і визначають ймовірність збереження цілісності гілки В цьому сутність підходу Вейбула [3–5].

Однак, врахуємо ще, що в області контакту діє перерізуюча сила, яка спричиняє зсувне напруження у приконтактній області. Внаслідок цього необхідна міцність контакту на зсув визначається співвідношенням:

$$\sigma_{sh} \geq 0.5 \rho g n l, \quad (5)$$

тому при  $n = 5000$  і довжині гілки з телуриду вісмуту  $l = 3$  мм необхідна міцність контакту на зсув складе 0.57 МПа, а це істотно менше істинної міцності контактів на зсув. Таким чином з

точки зору стійкості термоелектричних перетворювачів енергії при ударних навантаженнях істотно більшу роль відіграють згинальні напруження у термоелектричних гілках.  $2N_L$  – загальна кількість гілок уперетворювачі енергії.

Результати розрахунків за формулами (1)–(4) наведено на рис. 3.

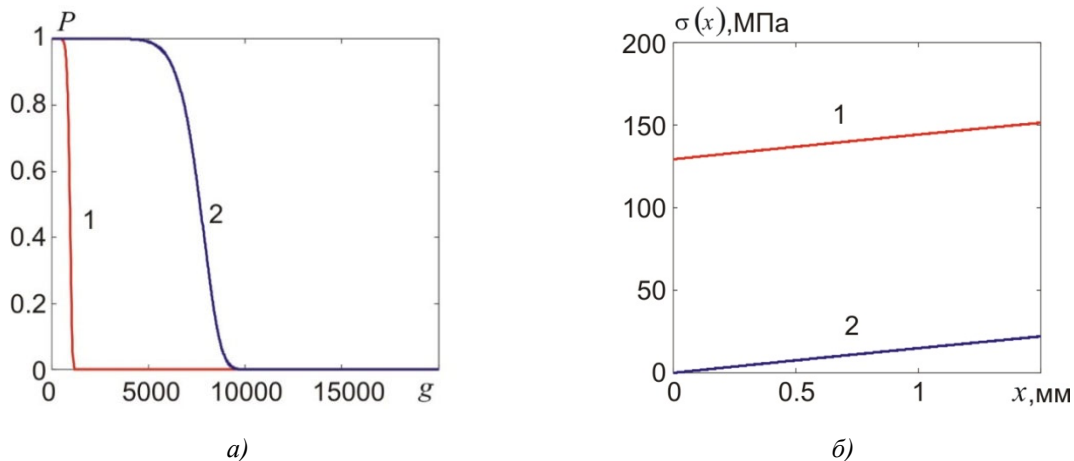


Рис. 3. Залежність імовірності безвідмовної роботи модуля після однократної дії ударного прискорення від величини прискорення (а) і відповідні епюри згинальних напружень за ударного прискорення 5000g (б) у випадках жорсткого (1) та еластичного (2) закріплення гілок.

З рисунка видно, що у випадку жорсткого закріплення гілок модуль з прийнятною ймовірністю здатен витримати лише ударне прискорення менше від 1000 g, за тріщиностійкістю – близько 2200g, а за міцністю контактної структури – лише 730 g. Але у разі еластичного закріплення термоелектричних гілок це прискорення зростає до 5000 g., тобто у 7 разів.

Причина такої різкої відмінності поглядає в тому, що епюри руйнуючих напружень при зазначених способах закріплення термоелектричних гілок різко відрізняються одна від одної. Половини їх (оскільки вони симетричні) зображено на рис. 3. а, б.

Визначимо тепер прогнозовану ударну стійкість термоелектричного перетворювача енергії, описаного у праці [2], враховуючи, що при дії ударів також має місце втома і, отже, результат кожного наступного удару істотно залежить від того, що відбулось у результаті попередніх ударів. Результати відповідних розрахунків наведено на рис. 3. б, де зображено залежності імовірності безвідмовної роботи модуля після одиночного удару в залежності від ударного прискорення для обох способів закріплення гілок.

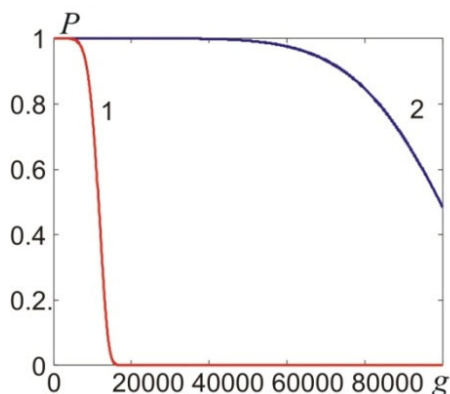


Рис. 4. Залежності імовірності безвідмовної роботи модуля після 1000 ударів з заданим прискоренням при жорсткому (1) та еластичному (2) закріпленні гілок.

З рисунка видно, що у випадку нежорсткого закріплення термоелектричних гілок модуль з прийнятною імовірністю витримає прискорення 20000 g, якщо параметри Вейбула термоелектричного матеріалу є такими, які отримались в ході аналізу результатів циклічних температурних випробувань. Для цього, однак, міцність матеріалу на розтріскування повинна бути, як впливає з рис. 3. б, не меншою за 72 МПа. А це цілком досяжно для спеціальних текстурованих матеріалів [6].

## Висновки

Шляхом поєднання підходу опору матеріалів з підходом Вейбула встановлено, що у випадку жорсткого закріплення гілок модуль з прийнятною ймовірністю здатен витримати лише ударне прикорення менше від 1000 g, за тріщиностійкістю – близько 2200 g, а за міцністю контактної структури – лише 730 g. Але у разі еластичного закріплення термоелектричних гілок це прискорення зростає до 5000 g. Причина такої різкої відмінності поглядає в тому, що епюри та значення руйнуючих напружень при зазначених способах закріплення термоелектричних гілок різко відрізняються одна від одної.

## Література

1. Pysarenko G.S., Kvitka O.L., Umanskyi H.S. (2004). *Strength of materials*. Kyiv: Vyscha shkola.
2. Park W., Barako M.T., Marconnet A.M. (2012). Effect of thermal cycling on commercial thermoelectric modules. *3d IEEE ITherm Conference, 2012*.
3. Weibull W. (1961). *Fatigue Testing and Analysis of Results*. Pergamon Press, 305 p.
4. Karri N.K. (2017). Reliable thermoelectric module design under opposite requirements from structural and thermoelectric considerations. *Journal of Electronic Materials*. DOI: 10.1007/s11664-017-5934-6.
5. A.A. Wereszczak and E.D. Case (2015). *Mechanical response of thermoelectric materials*. Oak Ridge, TN: ORNL/TM-2015/227, U.S. Department of Energy, 2015.
6. Zhao L.D, Zhang B.P, Li J.F, Zhang H.L, Liu W.S., et al. (2008). *Solid State Sci.*, 10, 651–658.

Надійшла до редакції: 22.02.2024.

**P.V. Gorskyi, DSc. (Phys-Math)<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;  
*e-mail: gena.grim@gmail.com*

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,  
2 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

## INCREASING THE SHOCK RESISTANCE OF THERMOELECTRIC ENERGY CONVERTERS

*By combining the strength of materials methods with the Weibull approach, the influence of the nature of fastening thermoelectric legs in a thermoelectric energy converter on the probability of its failure-free operation depending on the magnitude of the shock acceleration was investigated. It was proven that this acceleration, for a given probability of failure-free operation, significantly*

increases 7 times when replacing the rigid fastening of thermoelectric legs to ceramic plates with an elastic one.

**Key words:** shock resistance, thermoelectric energy converter, mechanical stresses, strength of materials, Weibull approach, rigid fastening, elastic fastening.

## References

1. Pysarenko G.S., Kvitka O.L., Umanskyi H.S. (2004). *Strength of materials*. Kyiv: Vyshcha shkola.
2. Park W., Barako M.T., Marconnet A.M. (2012). Effect of thermal cycling on commercial thermoelectric modules. *3d IEEE IITHERM Conference, 2012*.
3. Weibull W. (1961). *Fatigue Testing and Analysis of Results*. Pergamon Press, 305 p.
4. Karri N.K. (2017). Reliable thermoelectric module design under opposite requirements from structural and thermoelectric considerations. *Journal of Electronic Materials*. DOI: 10.1007/s11664-017-5934-6.
5. A.A. Wereszczak and E.D. Case (2015). *Mechanical response of thermoelectric materials*. Oak Ridge, TN: ORNL/TM-2015/227, U.S. Department of Energy, 2015.
6. Zhao L.D, Zhang B.P, Li J.F, Zhang H.L, Liu W.S., et al. (2008). *Solid State Sci.*, 10, 651– 658.

Submitted: 22.02.2024.