

УДК 621.362:539.55

Разіньков В.В., канд. фіз.-мат. наук¹

Кузь Р.В., канд. фіз.-мат. наук¹

Кречун М.В., аспірант^{1,2}

¹Інститут термоелектрики НАН та МОН України,

вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

e-mail: anatysh@gmail.com

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,

вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ДО ДІЇ МЕХАНІЧНИХ УДАРІВ

Показано можливість суттєвого підвищення стійкості термоелектричних модулів до дії механічних ударів. Бібл. 14, рис. 7, табл. 2.

Ключові слова: термоелектричні модулі, надійність.

Вступ

Термоелектричні модулі широко використовуються в різних галузях, зокрема в телекомунікаційних технологіях, аерокосмічній промисловості, оборонній та спеціальній техніці, медичній техніці, автомобілебудуванні та побутовій індустрії. Крім виконання функцій охолодження та нагріву у зазначених вище застосуваннях, термоелектричні модулі також використовуються для прямого перетворення енергії та рекуперації низькопотенційного скидного тепла в електричну енергію. Серед усіх застосувань істотна кількість модулів використовується в пристроях, які функціонують в умовах значних механічних навантажень – вібрації, ударів. Стійкість термоелектричних модулів до механічних навантажень особливо важлива при їх застосуванні у виробках військової техніки, аерокосмічних системах.

Метою цієї роботи є висвітлення методів підвищення стійкості термоелектричних модулів, які використовуються у виробках військової та аерокосмічної техніки, до дії механічних ударів.

1. Елементи конструкції сучасних модулів охолодження та їх вплив на надійність

Типові конструкції сучасних модулів охолодження, що серійно виготовляються в різних країнах світу [1, 2], містять послідовно з'єднані термопарні елементи, які змонтовано на плоских керамічних пластинах. Пластини виконують функцію електроізолюючих теплопереходів і одночасно слугують елементами конструкції, які забезпечують жорсткість та механічну міцність термоелектричного модуля. Таким чином, у згаданій конфігурації модуля термопарні напівелементи (гілки *n*- і *p*-типу провідності) з'єднані в послідовне електричне коло, а механічно і відносно напрямку теплового потоку – в паралельне.

Через те, що термоелектричні модулі являють собою твердотільні пристрої, то основним механізмом їх відмови буде руйнування або деградація напівелементів та паяних з'єднань. Такі відмови виникають внаслідок механічних напруг, які генеруються або зовнішнім джерелом

(удари, вібрації, бокові зсуви, стискаючі або розтягуючі навантаження), або внутрішніми чинниками (термомеханічні напруги, що виникають внаслідок суттєвої різниці коефіцієнтів термічного розширення матеріалів, з яких складаються елементи конструкції модулів: кераміки, міді, припою, нікелю, термоелектричного матеріалу).

У цій роботі розглядаються механічні напруги в термоелектричному модулі, які обмежуються випадком, коли їх виникнення спричинено дією одиночних механічних ударів.

Механічний удар супроводжується швидким виділенням енергії, в результаті чого в термоелектричному модулі виникають внутрішні локальні пружні або пластичні деформації, генеруються хвилі механічних напруг та інші ефекти, які призводять до втрати функціональних можливостей або навіть до повного руйнування конструкції модуля. Ударне навантаження на термоелектричний модуль генерує в ньому також власні резонансні коливання, які швидко затухають. Значення перевантажень внаслідок удару, характер та швидкість розподілу механічних напруг по конструкції модуля визначаються силою та часом дії удару, характером зміни прискорення. Удар, що діє на термоелектричний модуль, може спричинити його руйнування як цілісної конструкції. Одиночний удар може викликати руйнування термоелектричного модуля внаслідок виникнення потужних, хоча і короткочасних перенавантажень в складових елементах конструкції. Багаторазові одиночні удари можуть призвести до накопичення мікродеформацій, що також може привести до руйнування модуля. Внаслідок того, що конструкція термоелектричного модуля є аналогом просторової ферми (яка має резонансні властивості), навіть одиночний удар може викликати коливальний процес в ансамблі термоелектричних напівелементів, кінці яких жорстко закріплені між керамічними пластинами. Вказаний коливальний процес також може супроводжуватися появою мікротріщин в термоелектричному матеріалі та в зоні контактів термоелектричний матеріал – антидифузійне покриття – комутаційна пластина.

Стійкість термоелектричного модуля до дії ударів буде визначатися елементами його конструкції, які характеризуються найменшими значеннями межі міцності. Розглядаючи схему конструкції термоелемента (Рис. 1), можна зробити припущення, що максимальна міцність термоелемента буде визначатися межею міцності термоелектричного матеріалу.

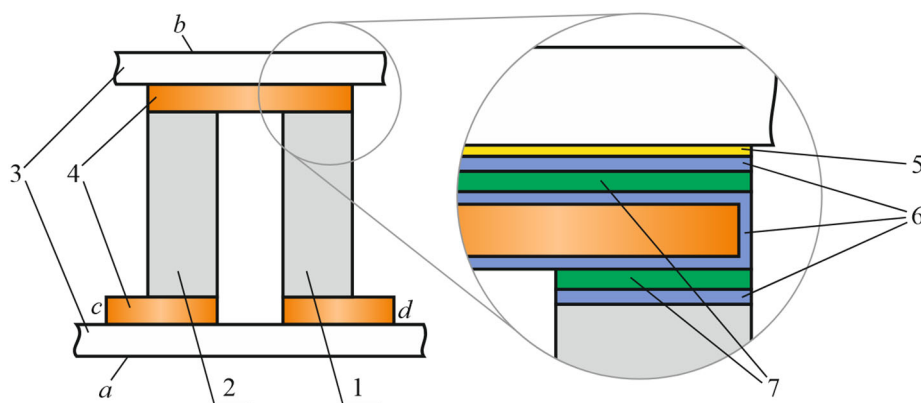


Рис. 1. Схема конструкції термоелемента:

1, 2 – напівелементи n- та p-типів провідності, 3 – керамічні пластини, 4 – мідні комутаційні пластини, 5 – металізація керамічної пластини, 6 – нікелеві шари відповідно на металізації керамічної пластини, мідній комутаційній пластині та контактній поверхні напівелемента, 7 – шари припою відповідно між керамічною пластинкою та комутаційною пластинкою, а також між комутаційною пластинкою і напівелементом. (a, b – «гаряча» і «холодна» сторони відповідно; c, d – струмопідводи)

Це впливає з тієї обставини, що міцність складових деталей термоелемента (керамічної пластини, мідної комутаційної пластини, проміжків припою в паяних з'єднаннях) суттєво перевищує її значення для термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту. Крім того вважається, що адгезійна міцність металізації до кераміки та нікелевого антидифузійного покриття до термоелектричного матеріалу повинна перевищувати когезійну міцність відповідних матеріалів. Наявність дефектів в покриттях призводить до зменшення їх адгезії і відповідно до зменшення міцності модулів в цілому. Особливо це стосується антидифузійних нікелевих шарів, розташованих на торцях гілок (напівелементів). До основних дефектів, які призводять до зменшення адгезії нікелевих антидифузійних покриттів на вітках відносяться: залишки приповерхневих порушених шарів термоелектричного матеріалу, мікротріщини, пустоти та каверни в приконтактній зоні матеріалу, невидалені локальні забруднення поверхні, на яку осаджуються шари нікелю, наявність оксидних плівок на поверхні, відпрацьованість та недостатня чистота компонент електроліту та інші чинники [3]. Крім того, погіршення адгезії антидифузійних покриттів може викликатися дефектами, які виникають при розрізуванні нікельованих заготовок термоелектричного матеріалу. При такому розрізуванні (навіть при найбільш щадному режимі при використанні алмазованих струн [4]) можуть виникати мікротріщини матеріалу під покриттям та мікровідриви покриття від матеріалу в зоні розрізування. Такі дефекти дуже важко виявити при виконанні контролю якості модулів. Вони потенційно небезпечні, тому що з часом можуть розвиватися і призводити до виходу з ладу термоелектричного модуля. Проведення випробувань навіть малочисельної вибірки з партії модулів на стійкість до одиночних ударів дозволяє виявити наявність небезпечних дефектів і в разі необхідності забракувати партію. Справа в тому, що при відсутності дефектів в антидифузійних покриттях їх адгезія буде перевищувати когезійну міцність термоелектричних матеріалів і стійкість модулів до ударів буде коливатися в межах, яка визначається варіацією когезії біля її середніх значень. В разі наявності дефектів в покриттях, які мають тенденцію до розвитку, стійкість модулів до ударів буде визначатися вже сукупністю характеристик когезійної міцності термоелектричних матеріалів та зменшеною адгезією. При цьому діапазон стійкості модулів до ударів буде зсунутий в бік менших прискорень. Розкид значень стійкості до ударів свідчить про наявність небезпечних подібних дефектів і необхідність бракувати партію модулів, які виготовлені в одному технологічному циклі. Дані, отримані при випробуваннях модулів на удар, можуть бути використані для визначення надійності виготовленої партії модулів шляхом знаходження матеріальної функції Вейбула [5].

2. Методика та результати випробувань термоелектричних модулів з стандартним типом антидифузійних покриттів на дію одиночних ударів

Умовою використання термоелектричних модулів в телекомунікаційній сфері є їх відповідність загальним вимогам до забезпечення надійності. Зараз загальноприйнятим регламентом по надійності термоелектричних модулів є документ Telcordia GR-468-CORE [6] та стандарти MIL-STD-883F [7]. У даній роботі наведено опис методики випробування термоелектричних модулів на стійкість до дії одиночних ударів, яка створена у відповідності до вказаних документів. Для випробувань довільним методом виконувалася вибірка 6 шт. модулів з партії 30 шт. Випробування проводились на розробленому в Інституті термоелектрики ударному стенді з падаючою платформою ЕБРИ.44043.001. Стенд дозволяє проводити випробування термоелектричних модулів в діапазоні пікових ударних навантажень 500–3400 g

при напівсинусоїдальній формі імпульсу прискорення, тривалістю 0.35–2.0 мс. Модулі закріплювалися нижньою керамічною пластиною на товсту перехідну до платформи металеву пластину за допомогою епоксидного адгезиву і витримувалися при кімнатній температурі протягом 24 годин. Це робилося з метою недопущення появи в модулі додаткових внутрішніх механічних напружень, які можуть впливати на результат випробувань. На верхню керамічну пластину по вказаній вище методиці кріпилася (в якості імітатора маси об'єкта, що охолоджується) металева пластина вагою 30 г. Випробування виконувалися при ударах з напівсинусоїдальною формою імпульсів прискорень, тривалістю 0.5 мс, спрямованих по бокових напрямках (осі X ; Y) та по нормалям до площини керамічних пластин модуля (вісь $+Z$ – стискаючі навантаження та вісь $-Z$ – розтягуючі навантаження). В принципі, випробування на вплив ударів по осі $+Z$ (стискаючі напруги) можна було би не виконувати, оскільки міцність термоелектричного матеріалу на стиснення набагато перевищує його міцність на розрив. Але і у цьому випадку ймовірність появи мікротріщин в тілі напівелемента, які в подальшому можуть розвинути до макророзмірів, призводить до необхідності виконувати випробування модулів на стійкість до ударів і в напрямку $+Z$. Кількість ударів по кожній осі – 5, початковий рівень пікових прискорень – 1000 g. Критерій виходу модуля з ладу – збільшення внутрішнього опору змінному струму більше ніж 1% (при сталій температурі модуля). Результати випробувань модулів з стандартним антидифузійним покриттям наведено в таблиці 1. З наведених результатів випливає, що має місце значний розкид значень стійкості модулів зі стандартними антидифузійними покриттями. Якщо максимальна стійкість модулів до ударів (1820 g, 1760 g, 1780 g) характеризується порушеннями цілісності модулів в зв'язку з розривом напівелементів по термоелектричному матеріалу, то мінімальна стійкість (1340 g, 1410 g, 1220 g) пов'язана з відшаруванням антидифузійного покриття з поверхні термоелектричного матеріалу на торцях напівелементів. Ця обставина спонукає до пошуку шляхів до збільшення адгезії антидифузійного покриття до стабільних значень, що перевищують когезійну міцність термоелектричного матеріалу.

Таблиця 1

Стійкість до ударів модулів з антидифузійним нікелевим покриттям класичного типу

№ модуля	$\Delta R/R$ – зміна опору модуля, %	Пікове прискорення, g	Вісь напрямку удару	Порядковий номер удару	Порядковий номер удару, при якому модуль зруйнувався
1-К	Розрив кола	1820	$-Z$	1	1
2-К	+3.9	1330	X	4	5
3-К	+5.1	1410	Y	3	4
4-К	Розрив кола	1760	$-Z$	1	1
5-К	+4.3	1220	X	2	3
6-К	+5.1	1780	$-Z$	1	2

3. Проектування та оптимізація антидифузійних покриттів підвищеної адгезії

Найпростішим (класичним) варіантом антидифузійного покриття є тонкий рівномірний шар електронейтрального до термоелектричного матеріалу металу, розташований на плоскій торцевій поверхні термоелектричного напівелемента. Насправді, адгезія в такому випадку буде

нижче очікуваної внаслідок наявності на поверхні термоелектричного матеріалу оксидних плівок, забруднень різного типу, абсорбованих молекул газів, води тощо. Поверхня напівелемента після розмірної обробки термоелектричного матеріалу має відхилення від ідеальної площинності, на її поверхні наявні мікротріщини та подряпини, також з'являється приповерхневий порушений шар термоелектричного матеріалу. Тому в результаті розрізування пластини термоелектричного матеріалу з антидифузійним покриттям на напівелементи можуть виникати мікротріщини шару антидифузійного покриття від поверхні термоелектричного матеріалу. Для підвищення адгезії антидифузійного покриття, поверхня торців напівелементів може бути рельєфною, або навіть у вигляді бандажу, коли антидифузійне покриття розташоване не тільки на торцевій площині напівелемента, але й на частині його бокової поверхні [8].

Аналітичний розрахунок впливу металевого покриття термоелектричних гілок на ефективність термоелемента зроблено в [9]. Але, як це властиво для аналітичних методів – такий розрахунок був можливим тільки завдяки певній кількості наближень та допущень.

Для визначення впливу комутаційних антидифузійних покриттів різноманітної геометричної конфігурації на ефективність термоелементів необхідно враховувати топологію приконтактної області. Необхідно також враховувати температурні залежності кінетичних коефіцієнтів термоелектричного матеріалу, теплові та електричні комутаційні опори, геометричну конфігурацію напівелементів та антидифузійних покриттів. Все це унеможливило практичне застосування аналітичних методів. Тому для точного встановлення впливу термоелектричних ефектів в приконтактній області напівелемента необхідним є застосування чисельних методів. У такому випадку задачу можна розглядати з найбільш узагальнених підходів, де термоелектричний перетворювач є частиною термоелектричного середовища, у якому

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha(x, y, z, T), \\ \sigma &= \sigma(x, y, z, T), \\ \kappa &= \kappa(x, y, z, T). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де α – коефіцієнт термоЕРС; σ – коефіцієнт електропровідності; κ – коефіцієнт теплопровідності; T – температура; x, y, z – просторові координати.

Виходячи з загальних законів збереження енергії у термоелектричному середовищі можна отримати рівняння для знаходження розподілу температури $T(x, y, z)$ та електричного потенціалу $U(x, y, z)$ в середовищі (для стаціонарного випадку) [10].

$$-\nabla(\kappa\nabla T) = \sigma\nabla(\alpha T + U)(\nabla U + \alpha\nabla T), \quad (2)$$

$$-\nabla(\sigma\alpha\nabla T) - \nabla(\sigma\nabla U) = 0. \quad (3)$$

Граничні умови для системи рівнянь (2), (3) матимуть наступний вигляд:

– для «гарячої» грані

$$T(x, y, z) = T_h = \text{const}; \quad (4)$$

– для струмопідводів

$$U_0 = 0 \text{ («земля»),} \quad (5)$$

$$U_l = \text{const (напряга живлення);} \quad (6)$$

– для всіх інших границь

$$\vec{n}(-\kappa\nabla T) = 0 \text{ (теплова ізоляція),}$$

$$\vec{n}(-\sigma\alpha\nabla T - \sigma\nabla U) = 0 \text{ (електрична ізоляція),} \quad (7)$$

де \vec{n} – вектор нормалі до границі.

Викладений підхід дозволяє довільним чином обирати коефіцієнти (1) і відповідно змінювати конфігурацію робочого об'єму напівелемента та антидифузійних покриттів.

У цій роботі система диференціальних рівнянь (2), (3) в частинних похідних другого порядку зі змінними коефіцієнтами (1) та граничними умовами (4)–(5) розв'язувалася на платформі COMSOL Multiphysics [11].

За допомогою вказаного підходу було розраховано вплив бандажного антидифузійного покриття на параметри термоелемента.

При моделюванні використовувалися значення кінетичних коефіцієнтів, отриманих на розробленому в Інституті термоелектрики обладнанні [12–13]. Вони наведені на рис. 2–5 для матеріалів *n*- та *p*-типів провідності. На рис. 5 наведено термоелектричну добротність *Z* термопари з таких матеріалів. Контактний електричний опір вимірювався за методикою [14] і в цій моделі вважався $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см², температура «гарячої» грані $T_h = 300$ К.

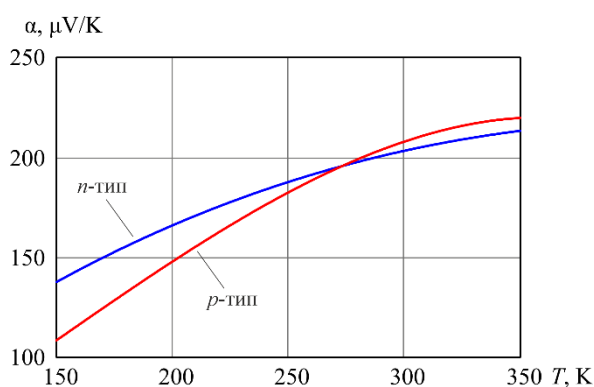


Рис. 2. Температурна залежність коефіцієнтів термоЕРС

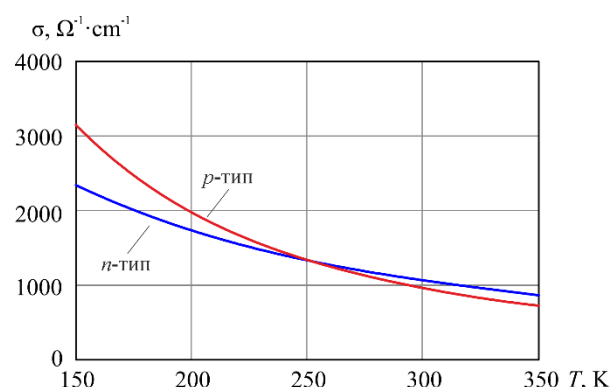


Рис. 3. Температурна залежність коефіцієнтів електропровідності

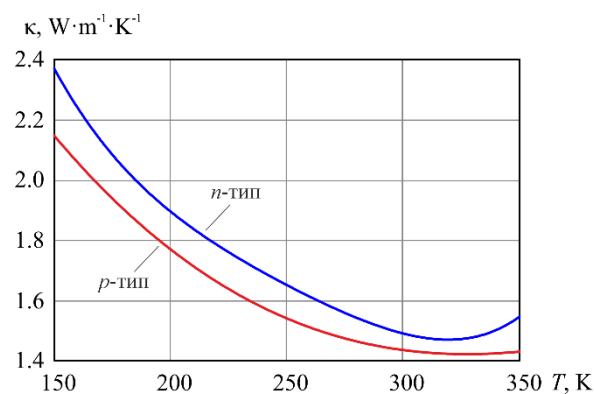


Рис. 4. Температурна залежність коефіцієнтів теплопровідності

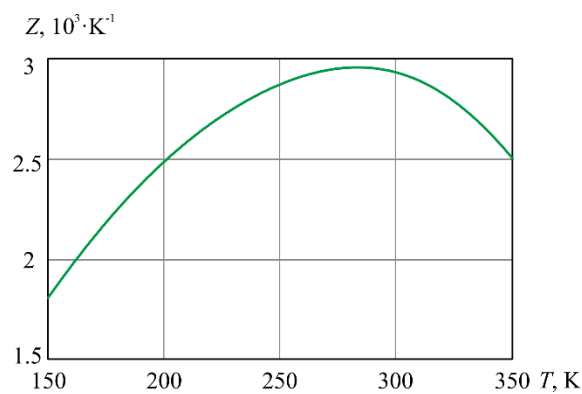


Рис. 5. Температурна залежність термоелектричної добротності

На рис. 6 наведено результати комп'ютерного моделювання впливу бандажного антидифузійного покриття на максимальний перепад температури термоелемента.

При відносно малих відносних висотах бандажу (до 4% від загальної висоти напівелемента) зменшення максимального перепаду температур складає всього 1.3% (біля 1°C). Навіть при збільшенні висоти бандажу до 12% від загальної висоти напівелемента падіння перепаду температур не перевищує 6% від його максимального значення. Отримані результати свідчать про незначне зниження енергетичних характеристик напівелементів при відносних висотах бандажного покриття до 10% від загальної висоти напівелемента. Це дає можливість

створювати високоефективні термоелектричні модулі з використанням бандажного типу антидифузійного покриття.

ΔT , К

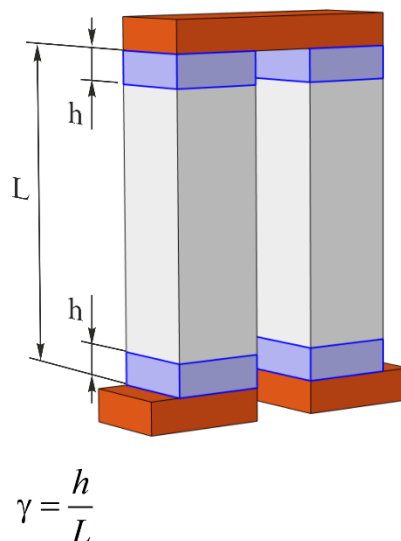
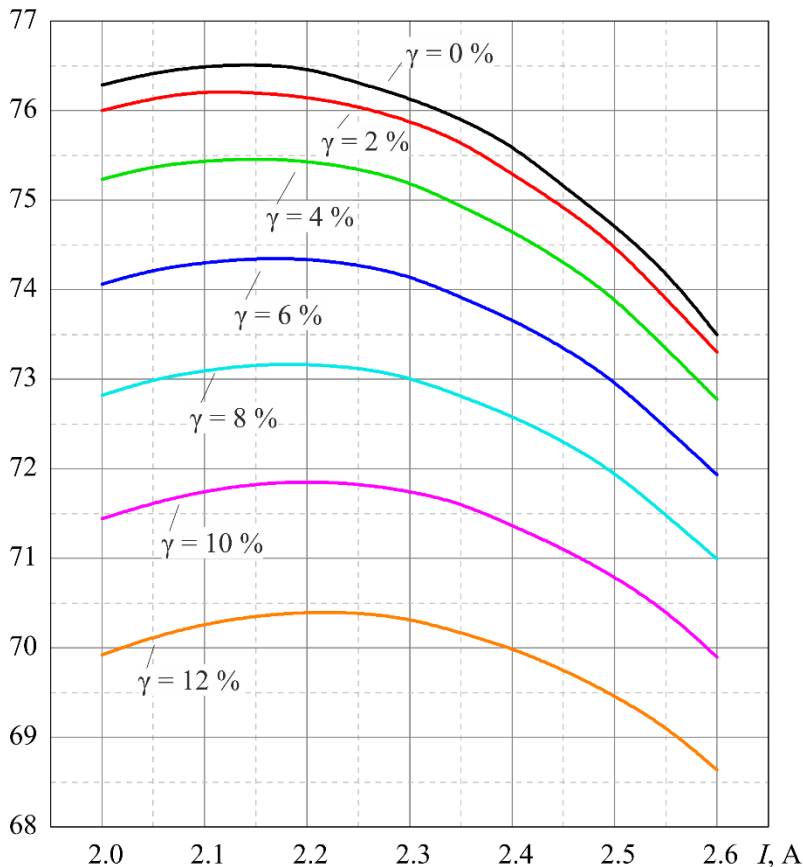


Рис. 6. Залежність перепаду температур ΔT термоелемента від величини струму живлення I та відносної висоти бандажного покриття $\gamma = h / L$ (h – висота бандажу, L – загальна висота напівелемента)

4. Результати випробувань стійкості модулів з бандажним антидифузійним покриттям напівелементів до дії одиночних ударів

Для проведення випробувань на стійкість до дії ударів було виготовлено партію модулів з бандажним антидифузійним покриттям в кількості 30 шт., повністю подібних по геометрії та використаному термоелектричному матеріалу до модулів з класичним антидифузійним покриттям.

Процедура підготовки модулів з бандажним антидифузійним покриттям до випробувань та самі випробування були аналогічними до методики, що використовувалася до модулів із звичайним антидифузійним покриттям.

Результати випробувань на стійкість модулів з бандажним антидифузійним покриттям напівелементів до дії одиночних ударів наведені в таблиці 2.

Всі модулі під час випробувань зруйнувалися внаслідок розриву напівелементів безпосередньо по термоелектричному матеріалу. Тобто адгезія бандажного антидифузійного покриття перевищує когезію термоелектричного матеріалу. Тому стійкість модулів з бандажним антидифузійним покриттям до дії ударів буде приблизно на одному рівні.

Таблиця 2

Стійкість до ударів модулів з антидифузійним нікелевим покриттям бандажного типу

№ модуля	$\Delta R/R$ – зміна опору модуля, %	Пікове прискорення, g	Вісь напрямку удару	Порядковий номер удару	Порядковий номер удару, при якому модуль зруйнувався
1-B	6.2	1900	- Z	2	3
2-B	16.7	2020	- Z	1	2
3-B	Розрив кола	2000	- Z	1	1
4-B	Розрив кола	2180	- Z	1	1
5-B	9.1	1880	- Z	2	3
6-B	1.4	2030	X	1	4

Розкид значень стійкості модулів з бандажним покриттям до дій ударів знаходиться в діапазоні, який визначається варіацією когезії термоелектричного матеріалу, на відміну від стійкості модулів із звичайним антидифузійним покриттям, у яких адгезія покриттів не завжди досягає рівня когезії матеріалу. На рис. 7 наведено гістограми, які побудовані у відповідності із значеннями стійкості модулів до дії ударів вказаних в таблицях 1 та 2.

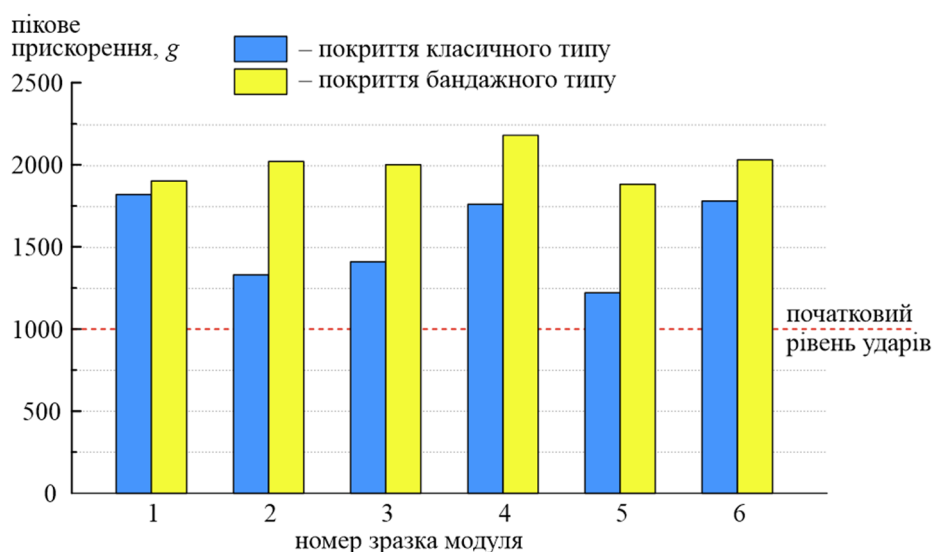


Рис. 7. Стійкість до ударів термоелектричних модулів з антидифузійними нікелевими покриттями класичного та бандажного типів

Видно, що стійкість модулів до дії ударів із звичайним типом антидифузійного покриття нестабільна і характеризується значним розкидом її значень, в той же час тотожні по геометрії та термоелектричному матеріалу модулі з антидифузійним покриттям бандажного типу характеризуються високою та стабільною стійкістю до дії ударів.

Висновки

1. Визначено вплив бандажного антидифузійного покриття на енергетичні параметри термоелементів.
2. Показано, що застосування термоелементів з антидифузійним покриттям бандажного типу значно підвищує стійкість термоелектричних модулів до дії механічних ударів.

Література

1. Hi-Z Technology, Inc. (n.d.). *Hi-Z thermoelectric modules*. Retrieved from <http://www.hi-z.com/hz2.php>
2. Digi-Key Electronics. (n.d.). *Coherent Thermal Solutions*. Retrieved from <https://www.digikey.com/en/supplier-centers/coherent-thermal-solutions>
3. Krechun M. (2019). Galvanic interconnects for thermoelectric cooling modules. *Physics and Chemistry of Solid State*, 20(1), 83–88. <https://doi.org/10.15330/pcss.20.1.88>
4. Zaporov S.F., & Zakharchuk T.V. (2018). Device for producing rectangular samples of thermoelectric material. *Journal of Thermoelectricity*, 2018(5), 81–88.
5. Gong J., Si W., & Guan Z. (2001). Weibull modulus of fracture strength of toughened ceramics subjected to small-scale contacts. *Journal of Materials Science*, 36, 2391–2396.
6. Ericsson. (n.d.). *GR-468 Standard*. Retrieved from <https://telecom-info.njdepot.ericsson.net/site/cgi/ido/docs.cgi?DOCUMENT=GR-468&ID=SEARCH>
7. NASA. (n.d.). *MIL-STD-883 Standard*. Retrieved from <https://nipp.nasa.gov/docuploads/31ECBD46-FFA0-43AE-82C09A3B2B6FE26B/std883.pdf>
8. Anatyshuk L.I., Antoniuk E.I., Luste O.J., & Razinkov V.V. (2008). *Thermoelement* [Patent of Ukraine No. UA81556].
9. Kuz R.V., & Gorskyi P.V. (2022). Analytical calculation of the effect of metal coating of thermoelectric legs on the efficiency of generator thermoelement. *Journal of Thermoelectricity*, 2022(1), 18–27.
10. Lysko V.V., Konstantynovych I.A., Kuz R.V., & Derevianko T.V. (2024). Possibilities of reducing the specific cost of thermoelectric generator energy converters. *Journal of Thermoelectricity*, 2024(3), 44–52.
11. COMSOL Inc. (n.d.). *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. Retrieved from <https://www.comsol.com>
12. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V., & Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *Journal of Thermoelectricity*, 2018(3), 80–88.
13. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., & Lysko V.V. (2015). Absolute method for measuring of thermoelectric properties of materials. *Materials Today: Proceedings*, 2(2), 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.110>
14. Lysko V.V., Anatyshuk L.I., & Strusovskiy K.I. (2023). Computer research on the accuracy of probe method for measuring “metal–thermoelectric material” electrical contact resistance. *Journal of Thermoelectricity*, 2023(4), 38–48.

Надійшла до редакції: 25.10.2024.

V.V. Razinkov, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*¹

R.V. Kuz, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*¹

M.V. Krechun, *postgraduate*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

e-mail: anatysh@gmail.com

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,

2 Kotsiubynskiy str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

WAYS TO INCREASE THE RESISTANCE OF THERMOELECTRIC COOLING MODULES TO MECHANICAL IMPACTS

The possibility of a significant increase in the resistance of thermoelectric modules to mechanical impacts is shown. Bibl. 14, Figs. 7, Tabl. 2.

Key words: thermoelectric modules, reliability.

References

1. Hi-Z Technology, Inc. (n.d.). *Hi-Z thermoelectric modules*. Retrieved from <http://www.hi-z.com/hz2.php>
2. Digi-Key Electronics. (n.d.). *Coherent Thermal Solutions*. Retrieved from <https://www.digikey.com/en/supplier-centers/coherent-thermal-solutions>
3. Krechun M. (2019). Galvanic interconnects for thermoelectric cooling modules. *Physics and Chemistry of Solid State*, 20(1), 83–88. <https://doi.org/10.15330/pcss.20.1.88>
4. Zaparov S.F., & Zakharchuk T.V. (2018). Device for producing rectangular samples of thermoelectric material. *Journal of Thermoelectricity*, 2018(5), 81–88.
5. Gong J., Si W., & Guan Z. (2001). Weibull modulus of fracture strength of toughened ceramics subjected to small-scale contacts. *Journal of Materials Science*, 36, 2391–2396.
6. Ericsson. (n.d.). *GR-468 Standard*. Retrieved from <https://telecom-info.njdepot.ericsson.net/site/cgi/ido/docs.cgi?DOCUMENT=GR-468&ID=SEARCH>
7. NASA. (n.d.). *MIL-STD-883 Standard*. Retrieved from <https://npp.nasa.gov/docuploads/31ECBD46-FFA0-43AE-82C09A3B2B6FE26B/std883.pdf>
8. Anatyshuk L.I., Antoniuk E.I., Luste O.J., & Razinkov V.V. (2008). *Thermoelement* [Patent of Ukraine No. UA81556].
9. Kuz R.V., & Gorskyi P.V. (2022). Analytical calculation of the effect of metal coating of thermoelectric legs on the efficiency of generator thermoelement. *Journal of Thermoelectricity*, 2022(1), 18–27.
10. Lysko V.V., Konstantynovych I.A., Kuz R.V., & Derevianko T.V. (2024). Possibilities of reducing the specific cost of thermoelectric generator energy converters. *Journal of Thermoelectricity*, 2024(3), 44–52.
11. COMSOL Inc. (n.d.). *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. Retrieved from <https://www.comsol.com>
12. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V., & Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *Journal of Thermoelectricity*, 2018(3), 80–88.
13. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., & Lysko V.V. (2015). Absolute method for measuring of thermoelectric properties of materials. *Materials Today: Proceedings*, 2(2), 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.110>
14. Lysko V.V., Anatyshuk L.I., & Strusovskiy K.I. (2023). Computer research on the accuracy of probe method for measuring “metal–thermoelectric material” electrical contact resistance. *Journal of Thermoelectricity*, 2023(4), 38–48.

Submitted: 25.10.2024.