



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І. ак. НАН України,^{1,2}
Лусте О.Я. доктор фіз.-мат. наук^{1,2}

¹Інститут термоелектрики НАН і 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
e-mail: anatysh@gmail.com



Лусте О.Я.

ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЇ НА РЕСУРСНІ ВЛАСТИВОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Одержання вдосконалених функціональних термоелектричних матеріалів та приконтактних структур підвищеної ресурсної стійкості для термоелектричних пристроїв з довготривалим терміном експлуатації в екстремальних умовах, в тому числі в космічному середовищі вимагає ретельного вивчення узагальнених часових функцій впливу температурних, механічних та інших дій при довготривалій експлуатації термоелектричних матеріалів та приконтактних структур, дослідження механізмів їх деградації, розробки методів проведення прискорених ресурсних випробувань та визначення статистичних закономірностей деградації термоелектричних матеріалів та приконтактних структур. В основу цих досліджень покладено сучасну теорію надійності. Бібл. 19, Рис. 3., Табл. 3.

Ключові слова: надійність, деградація, термоелектричні матеріали.

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ В ТЕРМОЕЛЕКТРИЦІ

Сучасна теорія надійності є частиною прикладної математики. Які ж риси відрізняють сучасну, «робочу» прикладну математику від традиційної, «класичної»? Нова методологія, новий набір прийомів, нова структура дослідження. Нагадаємо, як будувалося «класичне» дослідження із застосуванням математичних методів. Схема така: береться чітка постановка задачі, формулюються припущення, а потім поставлена задача вирішується за допомогою бездоганно точних формальних математичних перетворень. Суперечності, якщо вони виникають, стосуються лише правильності виконаних викладок (якщо вони невірні, робота відкидається), або того, чи найбільш вдалий з математичних методів обрав автор. Довільність, неминуча при постановці завдання (оскільки вона цілком вкладається в строго сформульовані умови), допускається лише один раз (найчастіше самим автором) і залишається за межами обговорення.

Типовий приклад: відома схема завдань класичної математичної статистики. Одного разу призначений (зауважимо, довільно!) рівень довіри (тобто ймовірність, за якої подія може розглядатися як достовірна) надалі «обговоренню та оскарженню не підлягає». Якщо вважається практично достовірною подія з ймовірністю, скажімо, 99 %, все подальше викладки проводяться вже бездоганно точно і строго, а питання про те, звідки взяли ці

99 % вважається ніби навіть і непристойним.

Інтонація міркувань приблизно така: нехай хтось сторонній призначив рівень довіри. Звідки він його взяв – не справа теорії; задача теорії – відповісти на питання: чи суперечить за встановленим рівнем довіри така-то гіпотеза дослідним даним?

Інший приклад. Вирішується задача оптимального планування випробувань на надійність. Якийсь параметр обирається як показник ефективності випробувань, а далі вже зовсім строгими методами шукається той варіант випробувань, який робить цей показник максимальним.

Чому призначений саме цей показник або вид функції мети – не обговорюється.

Дослідження починається з класичного формулювання: «Нехай задані...» і далі перераховуються параметри, які передбачаються «відомими». Звідки вони відомі, з якого джерела, з якою точністю? Таке питання навіть не ставиться. Відомі – і все. І ось будуються моделі, які з прикладної точки зору інакше не назвеш як «інформаційно неповноцінними».

Ця класична схема дослідження, що розділяє «замовника» і «виконавця», на наших очах старіє.

Для сучасної прикладної математики типово інше: єдність тих хто ставлять завдання і вирішують їх. Звернемо увагу ще на одну обставину. У традиційній математиці після того як завдання поставлене і допущення сформульовані, рішення шукається завжди на максимально доступному рівні точності. Для сучасної прикладної математики, навпаки, характерно вимога рівноточності всіх елементів дослідження. Точність апарату повинна відповідати точності, з якою нам можуть бути відомі вихідні дані. Якщо для виконання розрахунків за даною моделлю необхідне знання параметрів і функцій, які в осяжному майбутньому отримані бути не можуть, треба відмовитися від цієї моделі і замінити її іншою, хай менш точною, але такою, яка спирається на доступну інформацію.

Застосування теорії надійності в ситуаціях, де в наявності статистична стійкість і є потрібна інформація, цілком виправдано і може давати хороші результати. Не так стоїть справа в ситуаціях, де взагалі ніякою інформацією про невідомі фактори ми не володіємо. Такими завданнями (вибором рішення в умовах повної невизначеності) займається теорія статистичних рішень. Повністю заперечувати користь цієї теорії не можна, деякі прикидки вона дозволяє зробити, але не слід переоцінювати її можливості. Там, де немає інформації, рішення виходить неминуче погане, і краще не займатись його обґрунтуванням, а спробувати отримати потрібну інформацію в доступному обсязі. Однак відсутність інформації – біда, а не перевага дослідника, хоча саме в умовах відсутності інформації він має привід застосувати найбільш вишукані математичні методи. Тверезо поставлені завдання повинні і вирішуватися порівняно просто. Сумним є становище, коли математика починає глушити здоровий глузд. З двох крайнощів: «математика без здорового глузду» і «здоровий глузд без математики» перевагу, безумовно, треба віддати другий. Зрозуміло, краще за все, коли працює і те й інше, коли математичні розрахунки весь час перевіряються «здоровим глуздом» та узгоджуються з ним.

Але так буває далеко не завжди. Математичний апарат має якусь гіпнотичну властивість, і дослідники часто схильні беззастережно вірити своїм розрахункам, і тим більше вірити, чим складніший застосовано математичний апарат.

Реальна робота має на меті вказати на важливість відмови від традиційних помилок у використанні математичних методів теорії надійності. Для цього в якості прикладу далі розглянуті дві проблеми надійності термоелектричних приладів і систем – визначення

мінімально допустимого обсягу вибірки для випробувань і побудови надійних складних систем з ненадійних елементів [1].

ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО ОБСЯГУ ВИБІРКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ.

Визначення мінімально допустимого обсягу вибірки для випробувань – це завдання математичної статистики про побудову довірчого інтервалу при малому числі дослідів. Для цього розроблено досить тонкий апарат, заснований на припущенні, що нам відомий закон розподілу ознаки в генеральній сукупності (нормальний або експоненціальний). І знову виникає питання: а звідки, власне це відомо? І з якою точністю? І яка, нарешті, практична цінність самого «продукту» – довірчого інтервалу? Мало дослідів – значить мало інформації і справи наші погані. А чи буде при цьому довірчий інтервал трохи більше або менше, не так уже й важливо (тим більше що і довірна ймовірність призначена довільно). І все ж найчастіше цій проблемі приділяється не виправдано велика увага. Тут у наявності явна невідповідність між неточністю постановки задачі, малою цінністю висновків і досконалістю апарату. Взагалі, зловживання формальною стороною теорії ймовірностей на шкоду здоровому глузду – біда багатьох прикладних робіт, де математичний апарат – не засіб, а мета.

На теорію надійності часто дивляться як на свого роду чарівну паличку, що дозволяє отримувати інформацію з повного незнання. Але це неможливо – теорія тільки засіб перетворення однієї інформації в іншу.

Проте можливий і інший підхід, що ілюструється рис. 1.

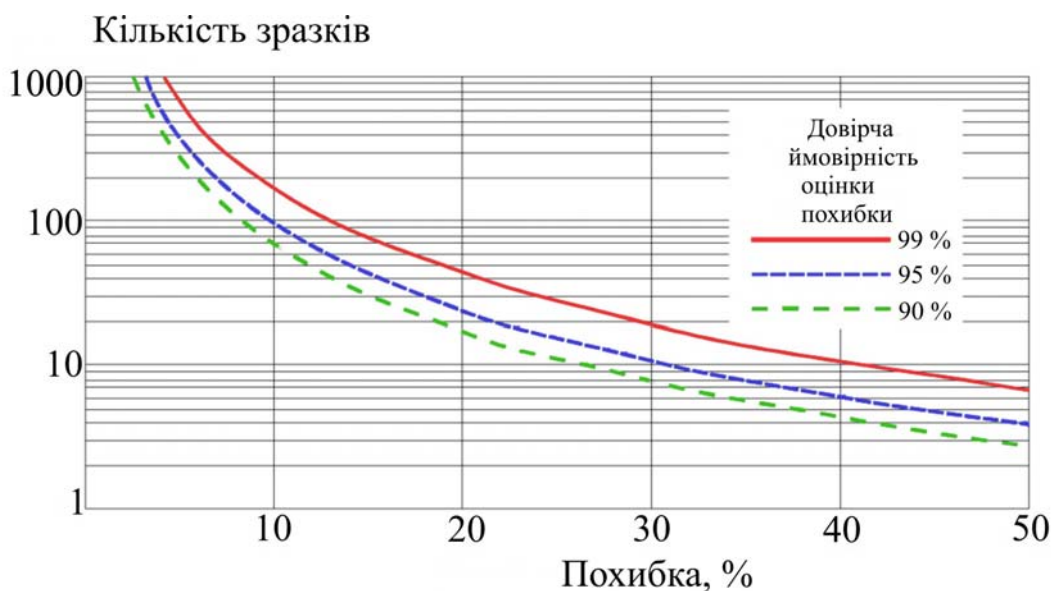


Рис. 1. Зв'язок кількості зразків в досліджуваній партії, похибки визначення параметрів надійності і довірчої ймовірності.

Тут зображено отримані в роботі [2] оцінки кількості зразків термоелектричних модулів в досліджуваній партії, похибки визначення параметрів надійності і довірчої ймовірності. При цьому і закон розподілу у генеральній сукупності, і всі обчислені і представлені на рис. 1 параметри визначені для даного числа зразків, а наведені криві ілюструють можливість вільного вибору замовником рівня довіри для даної похибки

визначення параметрів. Принципова відмінність цих оцінок полягає в тому, що при малому числі зразків деталі закону розподілу в генеральній сукупності, як показано в [3], несуттєві для цих оцінок.

ПОБУДОВА НАДІЙНИХ СКЛАДНИХ СИСТЕМ З НЕНАДІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІ

Завдання побудови надійних складних систем з ненадійних елементів може бути сформульовано як знаходження такої структури системи, яка забезпечує необхідний рівень надійності системи при доволіно малому рівні надійності її елементів. Прикладом може служити вибір електричної схеми термоелектричного генератора, варіанти якої вказані в табл. 1.

Таблиця 1

Приклади варіантів електричних схем термоелектричного генератора

Варіанти схем	Рівні структури			
	Нижній		Верхній	
	Число з'єднань			
	парал.	послід.	парал.	послід.
1	-	126	4	8
2	-	126	16	4
3	-	126	32	2
4	-	126	64	1
5	63	2	16	4
6	63	2	32	2
7	63	2	64	1

Вихідна електрична потужність ТЕГ $W(t)$ на узгодженому навантаженні визначається з виразу $W(t) = W_0 w_0(t) W_f(t)$, де W_0 – потужність генератора в початковому стані, $w_0(t)$ – відносна втрата потужності внаслідок закономірних процесів старіння, $W_f(t)$ – втрата потужності через випадкові відмови складових частин генератора, $w_0(t) = 1 - Kt$, де K – константа, яка визначається з результатів досліджень процесів старіння. Втрата потужності через випадкові відмови $W_f(t)$ обчислювалася з результатів статистики відмов на основі теорії надійності складних систем з використанням наступного співвідношення для вірогідності працездатного стану $R(t)$

$$R(t) = \sum_n \left[C_M^n \cdot R_m(t)^{M-n} (1 - R_m(t)) + \sum_n \left[C_M^n - \frac{L}{n} C_k^{a+1} C_{M-(a+1)}^{n-(a+1)} \right] (R_m(t)(1 - R_m(t)))^n \right] \quad (1)$$

де k – кількість паралельних включень в схемі генератора, L – кількість послідовних включень, M – загальне число модулів в генераторі, N допустима кількість відмов, D – загальне число відмов, а m – кількість допустимих відмов з k .

$T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$

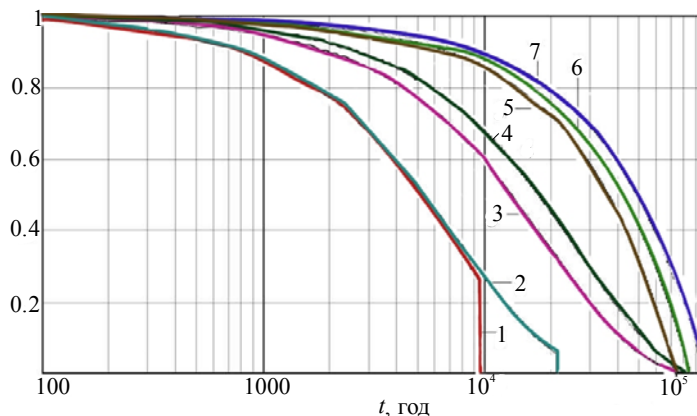


Рис. 2. Спад потужності ТЕГ з часом внаслідок відмов структурних елементів.

Розрахунки проводилися методом дискретних елементів за спеціально розробленою для цього комп'ютерною програмою. Програма дозволяє враховувати будь-які типи відмов елементів ТЕГ, моделюючи їх у вигляді розгалужених Марковських випадкових процесів. Можливий розрахунок і оптимізація електричної схеми пристрою не лише для будь-якого числа типорозмірів структурних елементів ТЕГ, але і за будь-яких обмежень на економічність, габарити, і ін. параметри. Результати наочно показують (рис. 2), що введення надлишкових паралельних з'єднань на все більш низьких рівнях ієрархії структури у міру переходу від схеми 1 до схем 2, 3, 4, 5, 6, 7 веде до різкого підвищення надійності системи.

Таким чином, неодмінною умовою підвищення надійності є наявність достовірної інформації про статистику відмов. Така статистично стійка інформація може бути отримана і при малих обсягах вибірки зразків для випробувань.

Оптимальний вибір структури складної системи дозволяє значно підвищувати рівень надійності системи для будь-якого рівня надійності елементів.

Границі пружності і циклічна стійкість

В роботі [3] визначено діагональні компоненти тензора пружних постійних C_{ijkl} матеріалів на основі Bi_2Te_3 , легованих ізовалентними домішками. Величини C_{ijkl} використано для дослідження механічних напруг, що виникають у термоелектричних модулях охолодження при термоциклюванні, а також встановлення меж пружної і пластичної деформацій.

Циклічна стійкість є фундаментальним експлуатаційним параметром модулів охолодження. Останнім часом увага дослідників зосереджена на підвищених вимогах до циклічної стійкості у зв'язку зі створенням апаратури, де використовується багаторазове охолодження, а також позиційне регулювання температури. Результати численних випробувань показали, що звичайні однокаскадні модулі Пельтьє розмірами $40 \times 40 \times 4$ мм при циклічних впливах температур в інтервалі $0 \div 100^{\circ}\text{C}$ руйнуються після декількох сотень циклів. З цього погляду підвищення циклічної стійкості термоелектричних модулів охолодження безсумнівно є актуальним. Істотним при цьому є визначення пружних постійних C_{ijkl} термоелектричних матеріалів як вихідних даних для розрахунку циклічної стійкості модулів.

Пружні властивості досконалих монокристалів Bi_2Te_3 досліджувалися в [2 – 4].

Відзначено, що підвищення термоелектричної добротності матеріалів шляхом введення ізовалентних домішок поряд зі зниженням фононної складової теплопровідності приводить, природно, і до погіршення механічних властивостей кристалів.

Було проведено акустичні дослідження пружних властивостей термоелектричних матеріалів $Bi_2Te_3 + 1\% SbI_3$ і $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3 + 2.5\% Te$ (просторова група $R\bar{3}m$, тригональна сингонія). Анізотропна структура цих матеріалів (відношення $c/a \div 7$) позначається і на високій пружній анізотропії матеріалів, що мають шість незалежних компонентів C_{ijkl} [4, 5]. Виміри адіабатичних C_{ijkl} проведено ультразвуковим імпульсним методом із дискретною затримкою на частоті 10 МГц при кімнатній температурі.

Результати вимірів для $Bi_2Te_3 + 1\% SbI_3$ наведено в таблиці 1 (C_{ij} у позначеннях В.Фойгта в одиницях 10^{11} дин/см²), де для порівняння наведено C_{ij} нелегованих кристалів Bi_2Te_3 [2, 3]. Порівнюючи виміряні у [2, 3] C_{ij} з нашими, бачимо, що введення ізовалентних домішок знижує C_{ij} легованих кристалів: постійні поздовжньої жорсткості C_{11} і C_{33} зменшуються відповідно на 20% і 4%, а постійна зсуву C_{44} – на 9%. За пружними постійними C_{ijkl} можна обчислити ряд широко використовуваних пружних параметрів – модулі Юнга E , зсуву G тощо для будь-якої орієнтації \vec{q} в кристалі. Наприклад, модулі Юнга $E(\vec{q})$ залежать від напрямку поздовжнього розтягу таким чином [4, 5]

$$E^{-1}(\vec{q}) = S_{11}(1 - q_3^2)^2 + S_{33}q_3^4 + (2S_{13} - S_{44})q_3^2(1 - q_3^2) + 2S_{14}(3q_1^2 - q_2^2)q_2q_3, \quad (2)$$

де S_{ij} – відповідні пружні піддатливості, зворотні тензорові пружних постійних C_{ij} .

Таблиця 2

Пружні постійні термоелектричних матеріалів на основі телуриду вісмуту

C_{mn}	Джерело даних		
	ІТЕ	[2]	[3]
	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3} + 1\% SbI_3$	Bi_2Te_3	Bi_2Te_3
C_{11}	5.747	6.46	6.847
C_{66}	-	2.88	2.335
C_{33}	4.573	4.73	4.768
C_{44}	2.487	2.50	2.738
C_{13}	-	-	2.703
C_{14}	-	-	1.325

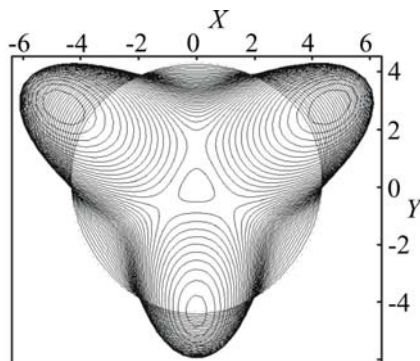


Рис. 3. Перерізи характеристичної поверхні модуля Юнга площинами (001).

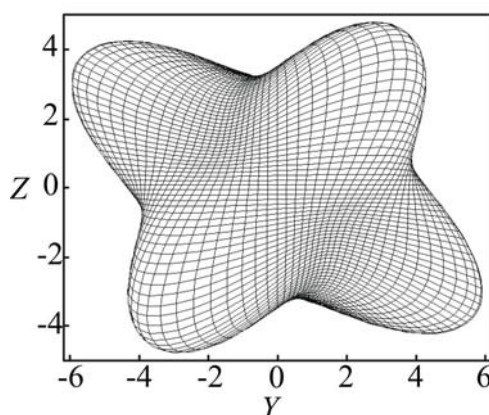


Рис. 4. Перерізи характеристичної поверхні модуля Юнга площинами (100).

Результати розрахунку орієнтаційних залежностей модуля Юнга за (1) наведені на рис. 1-2, наочно демонструють анізотропію пружності при розтягу. На відміну від модуля Юнга, модуль зсуву $G(\vec{p}, \vec{q})$ в кристалах залежить від двох напрямків: вектора нормалі до площини ковзання \vec{p} і перпендикулярного до нього вектора напрямку ковзання \vec{q}

$$G(\vec{p}, \vec{q}) = \frac{1}{S_{im}(\vec{p}\vec{q} + \vec{q}\vec{p})_i(\vec{p}\vec{q} + \vec{q}\vec{p})_j}, \quad (2)$$

де

$$(\vec{p}\vec{q} + \vec{q}\vec{p}) = p_i q_j + p_j q_i (i, j \leftrightarrow 1, \dots, 6). \quad (3)$$

Характер кутових залежностей модуля зсуву для площин (001) і (100) показано на рис.3. Порівнюючи рис. 1–2 і рис. 3, легко помітити, що анізотропія модуля зсуву G має той же характер, що й E . Площина (001) є площиною пружної ізотропії, однак у площині (100) анізотропія модуля зсуву істотна: $G(\vec{p}, \vec{q})$ має максимум при зусиллях зсуву \vec{p} і \vec{q} уздовж осей [101] і [001] і мінімум на бісектрисі кута між цими вісями. При цьому максимумами модуля зсуву в площині (100) у три рази менші ізотропного модуля $G(\vec{p}, \vec{q})$ для площини (001). Цей результат підтверджено безпосередніми статичними вимірами модулів зсуву на зразках, що мають форму та геометричні розміри в діапазонах, відповідних гілкам термоелектричних модулів охолодження. Безпосередніми статичними вимірами деформацій зсуву і відповідних тангенціальних напруг зсуву на таких зразках було визначено також межі пружності і межі міцності. Встановлено, що для зсувних деформацій відношення межі пружності в площині (001) до межі пружності в площині (100) лежить в інтервалі 4.5 ÷ 4.9. Для меж міцності подібне відношення близьке до 1.9.

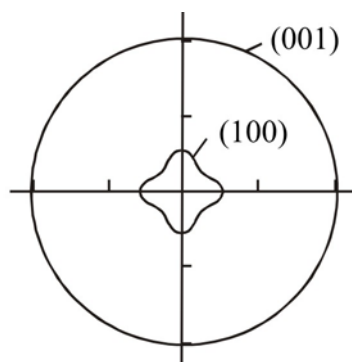


Рис. 5. Кутові залежності модуля зсуву в площинах (100) і (001).

Деформації гілок. Відомі параметри пружності і міцності термоелектричних матеріалів дозволяють розрахувати деформації і механічні напруги при циклічних вмиканнях/вимиканнях струму живлення модулів охолодження і визначити їхню циклічну стійкість.

Оскільки жорсткість керамічних пластин значно вища, ніж гілок, для розрахунків досить розглянути окрему вітку термоелектричного модуля, а механічну взаємодію гілки з керамікою врахувати в граничних умовах для механічних напруг на торцях гілки.

Локальні рівняння рівноваги деформованої гілки з анізотропного матеріалу мають вигляд

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

де $\hat{\sigma} = \hat{S}\hat{u}$ – тензор напруг, \hat{u} – тензор деформацій, \hat{S} – тензор коефіцієнтів пружних піддатливостей. Направивши вісь z вздовж поздовжньої осі гілок довжиною l , і розташували осі x, y в поперечному перерізі гілки площею ab , запишемо граничні умови на гранях $z = 0$ і $z = l$, вважаючи, що на грані $z = 0$ гілка жорстко закріплена, а до грані $z = l$ прикладена розподілена тангенціальна зсувна напруга $\Sigma(x, y)$.

$$u_{xx}|_{z=0} = u_{yy}|_{z=0} = u_{zz}|_{z=0} = 0, \quad (7)$$

$$\sigma_{xz}|_{z=l} = \Sigma(x, y), \quad \sigma_{xy}|_{z=l} = 0 \quad \sigma_{zz}|_{z=0} = 0. \quad (8)$$

Розв'язок задачі (4) – (8) для однорідних анізотропних віток вдається звести до граничної задачі для рівняння типу бігармонічного з анізотропними коефіцієнтами при старших похідних потенціалу деформацій. Оскільки загальної аналітичної теорії таких задач не існує, для їх розв'язку розроблені числові методи і відповідна комп'ютерна програма, що дозволяє для кожної вітки в залежності від профілю поперечного перерізу, розмірів і впливаючих зсувних зусиль визначити її деформацію і тим самим розрахувати циклічну стійкість усього модуля з урахуванням меж пружності і міцності.

Експериментальна методика випробування модулів. В роботі [3] був розроблений вимірвальний комплекс для проведення циклічних випробувань модулів охолодження, що дозволяє одночасно визначати циклічну стійкість 20 модулів. Комплекс дозволяє реалізувати широкий спектр режимів випробувань. Нами здебільшого проводилися випробування в жорстких умовах, коли на робочій поверхні модуля температура змінювалася в інтервалі $0 \div 100^\circ\text{C}$. При цьому температура тепловідвідної пластини підтримувалася в інтервалі $30 \div 40^\circ\text{C}$. Час циклу нагрівання і час циклу охолодження – по 5 хвилин. Усі модулі під час

випробувань знаходились в умовах, близьких до експлуатаційних. Для цього використовувалися стандартні теплопровідні пасти, а також стискання модуля зусиллям у 50 кг.

Було проведено випробування на модулях $40 \times 40 \times 3.5$ мм типу АЛТЕК-22. Для забезпечення статистичної вірогідності в кожній партії випробовувалося по 30 – 50 модулів. Випробування проводилися на модулях, виготовлених з матеріалів, отриманих різними методами – Чохральського і зонної рекристалізації.

Отримано наступні результати. Встановлено кореляцію між досконалістю термоелектричних матеріалів і циклічною стійкістю виготовлених з них модулів. Модулі, виготовлені з крупноблочних матеріалів зі значенням ΔT_{\max} від 66 – 68 К до 300 К, у звичайних умовах мають найкращу циклічну стійкість 400 – 1500 циклів. Для матеріалів з ΔT_{\max} в інтервалі 72 – 74 К циклічна стійкість зменшується до 200 – 400 циклів. При цьому підтримувався надійний контакт гілок з комутаційними пластинами, і тому розриви гілок завжди відбувалися по термоелектричному матеріалу. Стандартні гілки для модулів $1.4 \times 1.4 \times 1.6$ мм розриваються при зсувних навантаженнях $0.5 \div 1$ кг. При цьому найяскравіше виражена анізотропія меж пружності і меж міцності, що знаходиться в співвідношенні $1:2 \div 1:4$ і істотно залежить від структурної досконалості матеріалів, орієнтації тригональної площини і розміру кристалічних блоків. Привертає увагу та обставина, що між результатами розрахунку і результатами випробувань є істотне розходження, хоча якісно ці результати цілком корелюють, особливо за анізотропією параметрів. Це свідчить про те, що в модулях крім пружних деформацій існують й інші механізми, що істотно впливають на циклічну стійкість. Та обставина, що при циклічних випробуваннях руйнування гілок хоча і відбувається всередині термоелектричного матеріалу, але завжди в приконтатній області, якісно свідчить про те, що ці області, очевидно через технологічні операції, відрізняються більш низькою механічною міцністю. Ці обставини будуть предметом подальших досліджень.

У ході циклічних випробувань, як правило, руйнуванню піддаються периферійні вітки, що відповідає результатам комп'ютерних розрахунків розподілу напруг у модулях. Природно, що величина циклічної стійкості зростає із зменшенням розмірів керамічних пластин. Випробування в інтервалі $0 \div 100$ °С створюють у вітках зсувні деформації, що виходять за межі пружності, тому було здійснено заходи для зменшення величини деформації віток. Для цього робочі керамічні пластини до комутаційних пластин кріпили теплопровідними гумами товщиною $3 \div 10$ мкм. Демпфуюча дія таких гумових прокладок дозволила поліпшити циклічну стійкість модулів більш ніж у 10 разів. Результатом таких досліджень і випробувань було створення конструкції і технології виготовлення модулів підвищеної циклічної стійкості. Параметри деяких з них наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Характеристики термоелектричних модулів підвищеної циклічної стійкості

№ каталогу	$T_h = 27$ °С				Розміри (мм)						
	I_{\max} (А)	Q_{\max} (Вт)	V_{\max} (В)	ΔT_{\max} (К)							
Altec-СМ-1-S-IR-127- 1.4 × 1.4-2.5	3.6	31.9	15.00	72	40	40	46	46	43	43	4.9

Продовження таблиці 3

Altec-CM-1-S-IR-127- 1.6 × 1.6-2.0	5.9	51.7	15.00	71	40	40	46	46	43	43	4.4
Altec-CM-1-S-IR-127- 1.8 × 1.8-1.3	11.4	97.0	15.00	69	40	40	46	46	43	43	4.3
Altec-CM-1-S-IR-127- 2.0 × 2.0-1.15	15.9	141.1	15.00	68	40	40	46	46	43	43	4.7

Гарантована циклічна стійкість для температурного інтервалу $0 \div 100$ °C складає 10 тис. ÷ 15 тис. циклів. Зі зменшенням амплітуди зміни температури циклічна стійкість стрімко зростає до 150 тис. ÷ 200 тис. циклів. Істотною є та обставина, що параметри ΔT_{\max} циклічно стійких модулів зберігаються при використанні демпфуючих прошарків, а Q_{\max} зменшується не більше ніж на 3 %.

Висновки

1. Необхідною умовою поліпшення надійності є наявність реальної інформації про статистику відмов. Така статистично стабільна інформація може бути отримана навіть при невеликих розмірах вибірки для тестування. Оптимальний вибір складної структури системи дозволяє значно покращити рівень надійності системи для будь-якого рівня надійності компонентів.
2. Встановлено кореляцію між досконалістю термоелектричних матеріалів і циклічною стійкістю виготовлених з них модулів. При цьому найяскравіше виражена анізотропія меж пружності і меж міцності, що знаходиться в співвідношенні 1:2 ÷ 1:4 і істотно залежить від структурної досконалості матеріалів, орієнтації тригональної площини і величини кристалічних блоків.

Література

1. O.J.Luste. Reliability of Thermoelectric Devices , Journal of Thermoelectricity, v.4, N 1, 1996
2. L.I.Anatychuk, O.J.Luste, Journal of Thermoelectricity, , N 1, 2001
3. L.I. Anatychuk, V.N. Balazyuk, O.J. Luste, V.V. Malyshko, V.P. Mikhalchenko , Journal of Thermoelectricity, N 4, 2003 p 72
4. P.Click, R.Marlow, “Reliability and failure modes of thermoelectric heat pumps”, Proc. 2nd Intl. Conf. On Thermoelectric Energy Conversion, Arlington, Texas 1978, pp. 115-120.
5. H.T.Leong, R.T.Martorana, “Finite element stress analysis of a thermoelectric cooler”, Proc. 3rd Intl. Conf. On Thermoelectric Conversion, Arlington, Texas, 1980, pp. 86-91.
6. David D.Allred, On Van Nguyen, “Accelerated life test for thermoelectric junctions: solder element interactions”, Proc. 7th Intern. Conf. On Thermoelectric Energy Conversion, Arlington, Texas, 1988, pp. 137-140.
7. D.A.Johnson, J.S.Kendrick, “Improvements in reliability of thermoelectric coolers through the use of redundant elements”, Proc. 7th Intern. Conf. On Thermoelectric Energy Conversion, Arlington, Texas 1988 Ed. K.R.Rao, Ph.D., pp. 95-100.
8. P.A.Dillon, L.McCarthy, M.I.Stephenson, “Effects of thermal cycling on thermoelectric

- modules”, Proc. 9th Intern. Cons. On Thermoelectrics CIT, Pasadena, 1990, JPL, pp. 136-142.
9. Richard N.Alonso, Dwight A.Johnson, Roger Devilbiss, “Predicting thermoelectric cooler reliability for the telecommunications industry”, Proc. XI Intern. Conf. Thermoelectrics, Univ. Texas, Arlington, 1992, pp. 312-318.
 10. J.H.Kiely, D.V.Morgan, D.M.Rowe “Failure Analysis of a Thin Film Thermoelectric Generator”, Proc. XIII Intern. Conf. On Thermoelectrics, Kansas City, Missouri, USA, 1994.
 11. R.M.Redstall, R.Studd, “Reliability of Peltier Coolers in Fiber-Optic Laser Packages”, in *CRC Handbook of Thermoelectrics*, Ed. D.M.Rowe, CRC Press, Inc., pp. 641 - 645, 1995.
 12. K. Reinschke, *Modelle zur Zuverlässigkeits und Empfindlichkeitsanalyse von System*, bd.1, Berlin VEB Verlag Technik, 1973; bd.2, Berlin VEB Verlag Technik, 1974.
 13. *N.Wiener.*, Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series, *J.Willey, N-Y, 1950.*
 14. А.Н.Колмогоров, “Интерполяция и экстраполяция пространственно- однородных случайных последовательностей”, Изв.АН СССР, сер.мат.т.5, № 11, 1941, с. 3-11.
 15. Илисавский Ю.В. Упругие постоянные Bi_2Te_3 при 300 К // ФТТ. – 1961. – № 3. – С.3555.
 16. Jenkins J.O., Rayne J.A. Elastic Moduli of Bi_2Te_3 from 4.2 K to 300 K // Phys. Letters. – 1969. – Vol. A 30. – № 6. – P.349.
 17. Jenkins J.O., Rayne J.A. Ure. Elastic moduli and phonon properties of Bi_2Te_3 // Phys. Rev. – B6, 1609, 1972.
 18. Voigt W. Lehrbuch der Kristallphysik. – Leipzig: V. Teubner, (1910, 1928), 1966 (Nachdruck). – 978 p.
 19. Nye J. F. Physical properties of crystals. – Oxford: Clarendon Press, 1964. – 362 p.

Надійшла до редакції 15.11.2017

Анатичук Л.І. ак. НАН України,^{1,2}
Лусте О.Я. доктор физ.-мат. наук^{1,2}

¹Інститут термоелектричества, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина e-mail: anatyach@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского 2, Черновцы, 58012, Украина
e-mail: anatyach@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ДЕГРАДАЦИИ НА РЕСУРСНЫЕ СВОЙСТВА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.

Получение усовершенствованных функциональных термоэлектрических материалов и приконтактных структур повышенной ресурсной стойкости для термоэлектрических устройств с продолжительным сроком эксплуатации в экстремальных условиях, в том числе в космической среде, требует тщательного изучения обобщенных временных функций влияния температурных, механических и прочих воздействий при продолжительной эксплуатации термоэлектрических материалов и приконтактных структур, исследования механизмов их деградации, разработки методов проведения ускоренных ресурсных испытаний и определения статистических закономерностей

деградации термоэлектрических материалов и приконтактных структур. В основу этих исследований положена современная теория надежности. Библиография 19, Рис. 3., Табл. 3

Ключевые слова: надежность, деградация, термоэлектрические материалы.

L.I. Anatyshuk^{1,2} *acad. National Academy of Sciences of Ukraine,*
O.J. Luste^{1,2} *Doctor Phys.-math. Sciences*

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str, Chernivtsi, 58029, Ukraine; *e-mail: anatysh@gmail.com;*

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsiubynskiy str.,
Chernivtsi, 58012, Ukraine, *e-mail: anatysh@gmail.com*

THE EFFECT OF DEGRADATION ON THE SERVICE LIFE PROPERTIES OF THERMOELECTRIC MATERIALS

Obtaining improved functional thermoelectric materials and near-contact structures of increased service life for thermoelectric devices with a long-term operation under extreme conditions, including in space environment, requires thorough study of generalized time functions of temperature, mechanical and other effects during long-term operation of thermoelectric materials and near-contact structures, research on their degradation mechanisms, development of methods for carrying out accelerated life tests and determination of statistic laws of degradation of thermoelectric materials and near-contact structures. These investigations are based on modern reliability theory. Bibliography 19, Fig. 5, Tables 3.

Key words: reliability, degradation, thermoelectric materials.

References

1. Luste O.J. (1996). Reliability of thermoelectric devices. *J. Thermoelectricity*, 1, 5-13.
2. Anatyshuk L.I., Luste O.J. (2001). Osobennosti primeneniia teorii nadezhnosti v termoelektrichestve [Peculiarities of using reliability theory in thermoelectricity]. *Termoelektrichestvo - J. Thermoelectricity*, 1, 60-65 [in Russian].
3. Anatyshuk L.I., Balazyuk V.N., Luste O.J., Malyshko V.V., Mikhalchenko V.P. (2003). Povysheniie tsiklicheskoj ustoichivosti termoelektricheskikh modulei okhlazhdeniia [Increase of cyclic stability of cooling thermoelectric modules]. *Termoelektrichestvo - J. Thermoelectricity*, 4, 72-76 [in Russian].
4. Click P., Marlow R. (1978). Reliability and failure modes of thermoelectric heat pumps. *Proc. 2nd Intl. Conf. On Thermoelectric Energy Conversion* (Arlington, Texas, 1978) (pp. 115-120).
5. Leong H.T., Martorana R.T. (1980). Finite element stress analysis of a thermoelectric cooler. *Proc. 3rd Intl. Conf. On Thermoelectric Conversion* (Arlington, Texas, 1980) (pp. 86-91).
6. Allred David D., Nguyen On Van. (1988). Accelerated life test for thermoelectric junctions: solder element interactions. *Proc. 7th Intern. Conf. On Thermoelectric Energy Conversion* (Arlington, Texas, 1988) (pp. 137-140).
7. Johnson D.A., Kendrick J.S. (1988). Improvements in reliability of thermoelectric coolers through the use of redundant elements. *Proc. 7th Intern. Conf. On Thermoelectric Energy Conversion* (Arlington, Texas, 1988). K.R.Rao (Ed.) (pp. 95-100).

8. Dillon P.A., McCarthy L., Stephenson M.I. (1990). Effects of thermal cycling on thermoelectric modules. *Proc. 9th Intern. Conf. On Thermoelectrics* (Pasadena, JPL, 1990) (pp. 136-142).
9. Alonso Richard N., Johnson Dwight A., Devilbiss Roger. (1992). Predicting thermoelectric cooler reliability for the telecommunications industry. *Proc. XI Intern. Conf. Thermoelectrics* (Univ. Texas, Arlington, 1992) (pp. 312-318).
10. Kiely J.H., Morgan D.V., Rowe D.M. (1994). Failure analysis of a thin film thermoelectric generator. *Proc. XIII Intern. Conf. On Thermoelectrics* (Kansas City, Missouri, USA, 1994).
11. Redstall R.M., Studd R. (1995). Reliability of Peltier coolers in fiber-optic laser packages. *CRC Handbook of Thermoelectrics*. D.M.Rowe (Ed.). CRC Press, Inc. (pp. 641 – 645).
12. Reinschke K. (1973, 1974). *Modelle zur Zuverlassigkeits und Empfindlichkeitsanalyse von System*, Bd.1. Berlin: VEB Verlag Technik, 1973; Bd.2. Berlin: VEB Verlag Technik, 1974.
13. Wiener N. (1950). *Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series*. New York: J.Wiley.
14. Kolmogorov A.N. (1941). Interpolation and extrapolation of spatially-inhomogeneous random sequences. *Izvestiia Akademii Nauk SSSR. Matematika – Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Mathematics*, 5(11), 3-11 [in Russian].
15. Ilisavskii Yu.V. (1961). Uprugiiye postoiannyye Bi_2Te_3 pri 300 K [Elastic constants of Bi_2Te_3 at 300 K]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 3, 3555 [in Russian].
16. Jenkins J.O., Rayne J.A. (1969). Elastic moduli of Bi_2Te_3 from 4.2K to 300 K. *Phys.Letters A*, 30 (6), 349.
17. Jenkins J.O., Rayne J.A., Ure R.W. (1972). Elastic moduli and phonon properties of Bi_2Te_3 . *Phys. Rev. B*, 6, 1609.
18. Voigt W. (1966). *Lehrbuch der Kristallphysik*. Leipzig: B. Teubner.
19. Nye J. F. (1964). *Physical properties of crystals*. Oxford: Clarendon Press.

Submitted 15.11.2017