



Анатычук Л. И.

Анатычук Л. И. *акад. НАН Украины*^{1,2},
Лусте О. Я. *доктор физ.-мат. наук*^{1,2}

¹Институт термоэлектричества, 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



Лусте О. Я.

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. Библ. 19, Рис. 3., Табл. 3.

Ключевые слова: надежность, деградация, термоэлектрические материалы.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

Современная теория надежности является частью прикладной математики. Какие же черты отличают современную, «рабочую» прикладную математику от традиционной, «классической»? Новая методология, новый набор приемов, новая структура исследования. Напомним, как строилось «классическое» исследование с применением математических методов. Схема такая: берется четкая постановка задачи, формулируются предположения, а потом поставленная задача решается с помощью безупречно точных формальных математических преобразований. Споры, если они возникают, касаются лишь правильности произведенных выкладок (если они неверные, работа отбрасывается), или того, наиболее ли удачный из математических методов избрал автор. Произвольность, неминуемая при постановке задачи (поскольку она целиком укладывается в строго сформулированные условия), допускается лишь один раз (чаще всего самим автором) и остается за пределами обсуждения.

Типичный пример: известная схема задач классической математической статистики. Однажды назначенный (заметим, произвольно!) уровень доверия (то есть доверительная вероятность, при достижении либо превышении которой событие может рассматриваться как

достоверное) в дальнейшем «обсуждению и обжалованию не подлежит». Если полагают практически достоверным событие с вероятностью, скажем, 99 %, все дальнейшие выкладки проводятся уже безупречно точно и строго, а вопрос о том, откуда взялись эти 99 %, считается даже неприличным.

Интонация рассуждений приблизительно такова: пусть кто-то посторонний назначил уровень доверия. Откуда он его взял – не дело теории: ее задача – ответить на вопрос о том, противоречит ли при установленном уровне доверия такая-то гипотеза исследовательским данным?

Другой пример. Решается задача оптимального планирования испытаний на надежность. Какой-либо параметр избирается как показатель эффективности испытаний, а дальше уже математически строгими методами ищется тот вариант испытаний, который делает этот показатель максимальным.

Вопрос о том, почему назначен именно этот показатель или вид функции цели – не обсуждается.

Исследование начинается с классической формулировки: «Пусть заданы...» и далее перечисляются параметры, которые предполагаются «известными». Откуда они известны, из какого источника, с какой точностью? Такой вопрос даже не ставится. Известны – и всё. Поэтому строятся модели, которые с прикладной точки зрения иначе, как «информационно неполноценными» не назовешь.

Эта классическая схема исследования, разделяющая «заказчика» и «исполнителя», устаревает на наших глазах.

Для современной прикладной математики типично другое: единство тех, кто ставит задачи, и тех, кто решает их. Обратим внимание еще на одно обстоятельство. В традиционной математике после того как задача поставлена и допущения сформулированы, решение всегда ищется на максимально доступном уровне точности. Для современной прикладной математики, наоборот, характерно требование равноточности всех элементов исследования. Точность аппарата должна отвечать точности, с которой нам могут быть известны исходные данные. Если для выполнения расчетов по данной модели необходимо знание параметров и функций, которые в обозримом будущем получены быть не могут, надо отказаться от этой модели и заменить ее другой, пусть менее точной, но опирающейся на доступную информацию.

Применение теории надежности в ситуациях, где в наличии статистическая устойчивость и имеется нужная информация, целиком оправдано и может давать хорошие результаты. Не так обстоит дело в ситуациях, где вообще никакой информацией о неизвестных факторах мы не владеем. Такими задачами (выбором решения в условиях полной неопределенности) занимается теория статистических решений. Полностью отрицать полезность этой теории нельзя, некоторые прикидки она позволяет сделать, но не следует переоценивать ее возможности. Там, где нет информации, решение получается неизбежно плохое, и лучше не трудиться над его обоснованием, а попытаться получить нужную информацию в доступном объеме. Однако отсутствие информации – беда, а не преимущество исследователя, хотя именно в условиях отсутствия информации он имеет возможность употребить наиболее изысканные математические методы. Трезво поставленные задачи должны и решаться сравнительно просто. Печальным является положение, когда математика начинает заглушать здравый смысл. Из двух крайностей: «математика без здравого смысла» и «здравый смысл без математики» преимущество, безусловно, следует отдать второй. Понятно, лучше всего, когда работает и то,

и другое, когда математические расчеты все время проверяются «здравым смыслом».

Но так бывает далеко не всегда. Математический аппарат имеет какое-то гипнотическое свойство, и исследователи часто склонны безоговорочно верить своим расчетам, и тем больше верить, чем более сложный математический аппарат применен.

Настоящая работа имеет целью указать на важность отказа от традиционных ошибок в использовании математических методов теории надежности. Для этого в качестве примера далее рассмотрены две проблемы надежности термоэлектрических приборов и систем – определение минимально допустимого объема выборки для испытаний и построения надежных сложных систем из ненадежных элементов [1].

Определение минимально допустимого объема выборки для испытаний

Определение минимально допустимого объема выборки для испытаний – это задача математической статистики о построении доверительного интервала при малом числе опытов. Для этого разработан довольно тонкий аппарат, основанный на предположении, что нам известен закон распределения признака в генеральной совокупности (нормальный или экспоненциальный). И снова возникает вопрос: а откуда, собственно, это известно? И с какой точностью? И какая, в конце концов, практическая ценность самого «продукта» – доверительного интервала? Мало опытов – значит мало информации и дело наше неважно. А будет ли при этом доверительный интервал немного больше или меньше, не так уж и важно (тем более что и доверительная вероятность назначена произвольно). И все же чаще всего этой проблеме отводится незаслуженно большое внимание. Здесь в наличии явное несоответствие между неточностью постановки задачи, малой ценностью выводов и совершенством аппарата. Вообще, злоупотребление формальной стороной теории вероятностей в ущерб здравому смыслу – беда многих прикладных работ, где математический аппарат – не средство, а цель.

На теорию надежности нередко смотрят как на своего рода волшебную палочку, которая позволяет получать информацию из полного незнания. Но это невозможно: теория – только средство преобразования одной информации в другую.

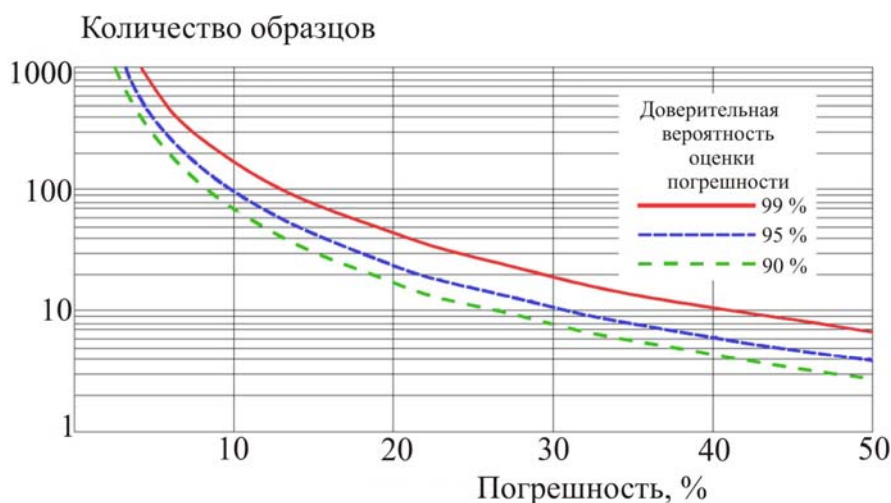


Рис. 1. Связь количества образцов в исследуемой партии, погрешности определения параметров надежности и доверительной вероятности.

Однако возможен и другой подход, который иллюстрируется рис. 1. Здесь изображены полученные в работе [2] оценки количества образцов термоэлектрических модулей в исследуемой партии, погрешности определения параметров надежности и доверительной вероятности. При этом и закон распределения в генеральной совокупности, и все вычисленные и представленные на рис. 1 параметры определены для данного числа образцов, а приведенные кривые иллюстрируют возможность свободного выбора заказчиком уровня доверия для данной погрешности определения параметров. Принципиальное отличие этих оценок заключается в том, что при малом числе образцов детали закона распределения в генеральной совокупности, как показано в [3], несущественны для этих оценок.

Построение надежных сложных систем из ненадежных элементов

Задача построения надежных сложных систем из ненадежных элементов может быть сформулирована как нахождение такой структуры системы, которая обеспечивает необходимый уровень надежности системы при произвольно малом уровне надежности ее элементов. Примером может служить выбор электрической схемы термоэлектрического генератора ТЭГ, варианты которой указаны в табл. 1

Таблица 1

Примеры вариантов электрических схем термоэлектрического генератора.

Варианты схем	Уровни структуры			
	Нижний		Верхний	
	Число соединений			
	парал.	послед.	парал.	послед.
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

Исходная электрическая мощность ТЭГ $W(t)$ на согласованной нагрузке определяется из выражения $W(t) = W_0 w_0(t) W_f(t)$, где W_0 – мощность генератора в начальном состоянии; $w(t)$ – относительная потеря мощности из-за закономерных процессов старения; $W_f(t)$ – потеря мощности из-за случайных отказов составных частей генератора; $w_0(t) = 1 - Kt$, где K – константа, которая определяется из результатов исследований процессов старения. Потеря мощности из-за случайных отказов $W_f(t)$ вычислялась из результатов статистики отказов на основе теории надежности сложных систем с использованием следующего соотношения для вероятности работоспособного состояния $R(t)$

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

где k – количество параллельных включений в схеме генератора, L – количество

последовательных включений, M – общее число модулей в генераторе, N – допустимое количество отказов, D – общее число отказов, а m – количество допустимых отказов из k .

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

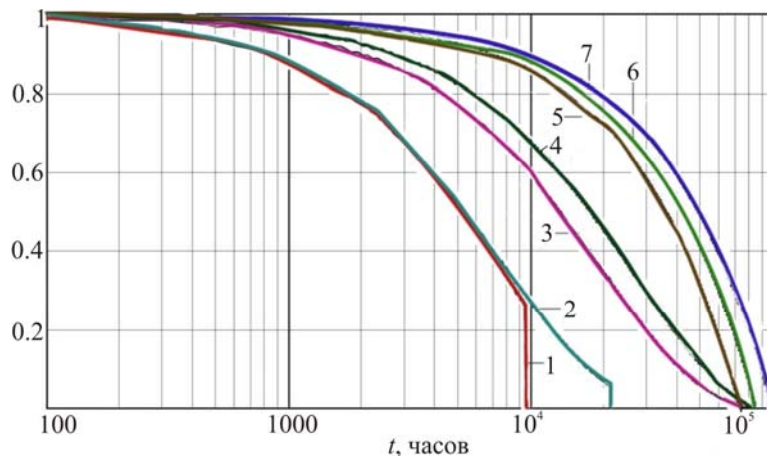


Рис. 2. Убывание мощности ТЭГ со временем вследствие отказов структурных элементов.

Расчеты проводились методом дискретных элементов специально разработанной для этого компьютерной программой. Программа позволяет учитывать любые типы отказов элементов ТЭГ, моделируя их в виде разветвленных Марковских случайных процессов. Возможны расчеты и оптимизация электрической схемы устройства не только для любого числа типоразмеров структурных элементов ТЭГ, но и при любых ограничениях на экономичность, габариты и прочие параметры. Результаты наглядно показывают (рис. 2), что введение избыточных параллельных соединений на все более низких уровнях иерархии структуры по мере перехода от схемы 1 к схемам 2, 3, 4, 5, 6, 7 ведет к резкому повышению надежности системы.

Таким образом, неперенным условием повышения надежности является наличие достоверной информации о статистике отказов. Такая статистически устойчивая информация может быть получена и при малых объемах выборки образцов для испытаний.

Оптимальный выбор структуры сложной системы позволяет значительно повысить уровень надежности системы при любом уровне надежности элементов.

Границы упругости и циклическая стойкость

В работе [3] определены диагональные компоненты тензора упругих постоянных C_{ijkl} материалов на основе Bi_2Te_3 , легированных изовалентными примесями. Величины C_{ijkl} использованы для исследования механических напряжений, которые возникают в термоэлектрических модулях охлаждения при термоциклировании, а также для установления границ упругой и пластической деформаций.

Результаты многочисленных испытаний показали, что обычные однокаскадные модули Пельтье размерами $40 \times 40 \times 4$ мм при циклических влияниях температур в интервале $0 \div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ разрушаются после нескольких сотен циклов. С этой точки зрения повышение циклической стойкости термоэлектрических модулей охлаждения, несомненно, является актуальным. Существенным при этом является определение упругих постоянных C_{ijkl} термоэлектрических материалов, как исходных данных для расчетов циклической стойкости модулей.

Упругие свойства совершенных монокристаллов Bi_2Te_3 исследовались в [2 – 4]. Отмечено, что повышение термоэлектрической добротности материалов путем введения изовалентных примесей вместе со снижением фононной составляющей теплопроводности приводит, естественно, и к ухудшению механических свойств кристаллов.

Циклическая стойкость является фундаментальным эксплуатационным параметром модулей охлаждения. В последнее время внимание исследователей сосредоточено на повышенных требованиях к циклической стойкости в связи с созданием аппаратуры, в которой используется многоразовое охлаждение, а также позиционное регулирование температуры.

Были проведены акустические исследования упругих свойств термоэлектрических материалов $Bi_2Te_3 + 1\%Sb_{i3}$ и $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3 + 2.5\%Te$ (пространственная группа R_{3m} , тригональная сингония). Анизотропная структура этих материалов (отношение $c/a \div 7$) сказывается и на высокой упругой анизотропии материалов, соответствующий тензор которых имеет шесть независимых компонент C_{ijkl} [4, 5]. Измерение адиабатических C_{ijkl} проведено ультразвуковым импульсным методом с дискретной задержкой на частоте 10 МГц при комнатной температуре.

Результаты измерений для $Bi_2Te_3 + 1\%Sb_{i3}$ приведены в табл. 2 (C_{ij} в обозначениях В. Фойгта в единицах 10^{11} дин/см²), где для сравнения приведены C_{ij} нелегированных кристаллов Bi_2Te_3 [2, 3]. Сравнивая измеренные в [2, 3] C_{ij} с нашими, видим, что введение изовалентных примесей снижает C_{ij} легированных кристаллов: постоянные продольной жесткости C_{11} и C_{33} уменьшаются соответственно на 20 % и 4 %, а постоянная сдвига C_{44} – на 9 %. По упругим постоянным C_{ijkl} можно вычислить ряд широко используемых упругих параметров – модули Юнга E , сдвига G и т.п., для любой ориентации \vec{q} в кристалле. Например, модули Юнга $E(\vec{q})$ зависят от направления продольного растяжения таким образом [4, 5]

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

где S_{ij} – упругие податливости, равные компонентам тензора, обратного тензору упругих постоянных C_{ij} .

Таблица 2

Упругие постоянные термоэлектрических материалов
на основе теллурида висмута

c_{mn}	Источник данных		
	ИТЭ	[2]	[3]
	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3} + 1\%Sb_{i3}$	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

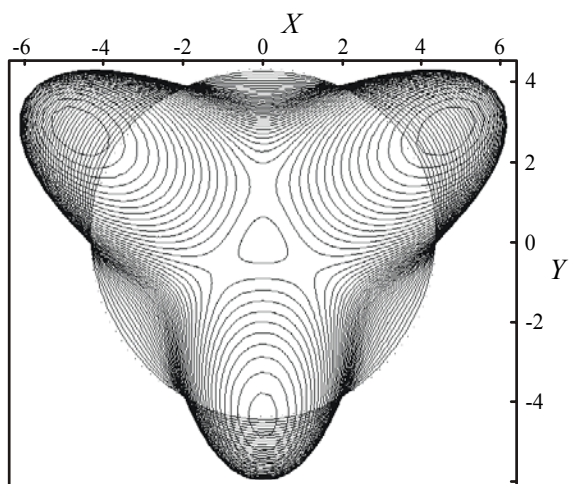


Рис. 3. Сечения характеристической поверхности модуля Юнга плоскостями (001).

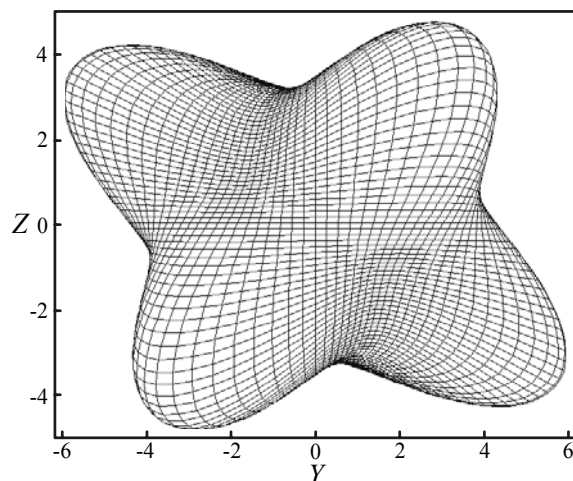


Рис. 4. Сечения характеристической поверхности модуля Юнга плоскостями (100).

Результаты расчетов ориентационных зависимостей модуля Юнга по (1), приведенные на рис. 3,4, наглядно демонстрируют анизотропию упругости при растяжении. В отличие от модуля Юнга, модуль сдвига $G(\vec{p}, \vec{q})$ в кристаллах зависит от двух направлений: вектора нормали к плоскости скольжения \vec{p} и перпендикулярного к нему вектора направления скольжения \vec{q}

$$G(\vec{p}, \vec{q}) = \frac{1}{S_{im}(\vec{p}\vec{q} + \vec{q}\vec{p})_i(\vec{p}\vec{q} + \vec{q}\vec{p})_j}, \quad (3)$$

где

$$(\vec{p}\vec{q} + \vec{q}\vec{p}) = p_i q_j + p_j q_i \quad (i, j \leftrightarrow 1, \dots, 6). \quad (4)$$

Характер угловых зависимостей модуля сдвига для плоскостей (001) и (100) показан на рис. 5.

Сравнивая рис.3 – 4 и рис. 5, легко заметить, что анизотропия модуля сдвига G имеет тот же характер, что и E . Плоскость (001) является плоскостью упругой изотропии, однако в плоскости (100) анизотропия модуля сдвига существенна: $G(\vec{p}, \vec{q})$ имеет максимум при усилиях сдвига \vec{p} и \vec{q} вдоль осей [010] и [001] и минимум на биссектрисе угла между этими осями. При этом максимумы модуля сдвига в плоскости (100) в три раза меньше изотропного модуля $G(\vec{p}, \vec{q})$ для плоскости (001). Этот результат подтвержден непосредственными статическими измерениями модулей сдвига на образцах, которые имеют форму и геометрические размеры в диапазонах, соответствующих ветвям термоэлектрических модулей охлаждения. Непосредственными статическими измерениями деформаций сдвига и соответствующих тангенциальных напряжений сдвига на таких образцах были определены также пределы упругости и пределы прочности. Установлено, что для деформаций сдвига отношение предела упругости в плоскости (001) к пределу упругости в плоскости (100) лежит в интервале $4.5 \div 4.9$. Для пределов прочности подобное отношение близкое к 1.9.

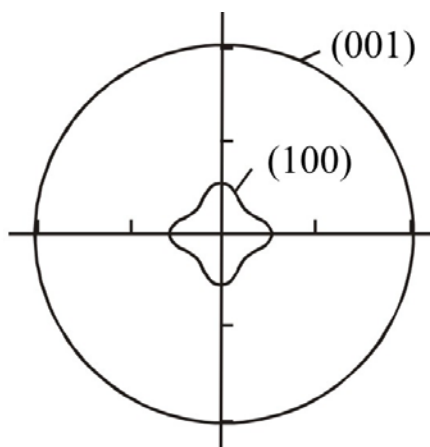


Рис. 5. Угловые зависимости модуля сдвига в плоскостях (100) и (001).

Деформации ветвей. Известные параметры упругости и прочности термоэлектрических материалов позволяют рассчитать деформации и механические напряжения при циклических включениях/выключениях тока питания модулей охлаждения и определить их циклическую стойкость.

Поскольку жесткость керамических пластин значительно выше, чем ветвей, для расчетов достаточно рассмотреть отдельную ветвь термоэлектрического модуля, а механическое взаимодействие ветви с керамикой учесть в предельных условиях для механических напряжений на торцах ветви.

Локальные уравнения равновесия деформированной ветви из анизотропного материала имеют вид

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

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

$$\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

где $\hat{\sigma} = \hat{S}\hat{u}$ – тензор напряжений, \hat{u} – тензор деформаций, \hat{S} – тензор коэффициентов упругих податливостей. Направив ось z вдоль продольной оси ветвей длиной l , и расположив оси x, y в поперечном сечении ветви площадью ab , запишем предельные условия на гранях $z = 0$ и $z = l$, считая, что на грани $z = 0$ ветвь жестко закреплена, а к грани $z = l$ приложено распределенное тангенциальное напряжение $\Sigma(x, y)$:

$$u_{xx}|_{z=0} = u_{yy}|_{z=0} = u_{zz}|_{z=0} = 0, \quad (8)$$

$$\sigma_{xz}|_{z=l} = \Sigma(x, y), \quad \sigma_{xy}|_{z=l} = 0, \quad \sigma_{zz}|_{z=0} = 0. \quad (9)$$

Решение задачи (5) – (9) для однородных анизотропных ветвей удастся свести к предельной задаче для уравнения типа бигармонического с анизотропными коэффициентами при старших производных потенциала деформаций. Поскольку общей аналитической теории таких задач не существует, для их решения разработаны числовые методы и соответствующая компьютерная программа, которая позволяет для каждой ветви в зависимости от профиля поперечного сечения, размеров и влияющих сдвиговых усилий определить ее деформацию и тем самым рассчитать циклическую стойкость всего модуля с учетом пределов упругости и прочности.

Экспериментальная методика испытания модулей. В работе [3] был разработан измерительный комплекс для проведения циклических испытаний модулей охлаждения, который позволяет одновременно определять циклическую стойкость 20 модулей. Комплекс позволяет реализовать широкий спектр режимов испытаний. Нами большей частью проводились испытания в жестких условиях, когда на рабочей поверхности модуля температура менялась в интервале $0 \div 100$ °С. При этом температура теплоотводящей пластины поддерживалась в интервале $30 \div 40$ °С. Время цикла нагрева и время цикла охлаждения – по 5 минут. Все модули во время испытаний находились в условиях, близких к эксплуатационным. Для этого использовались стандартные теплопроводные пасты, а также сжатие модуля усилием в 50 кг.

Были проведены испытания на модулях $40 \times 40 \times 3.5$ мм типа АЛТЕК-22. Для обеспечения статистической достоверности в каждой партии испытывалось по 30 – 50 модулей. Испытания проводились на модулях, изготовленных из материалов, полученных разными методами – Чохральского и зонной рекристаллизации.

Получены следующие результаты. Установлена корреляция между совершенством термоэлектрических материалов и циклической стойкостью изготовленных из них модулей. Модули, изготовленные из крупноблочных материалов со значением ΔT_{\max} от 66 – 68 К до 300 К, в обычных условиях имеют наилучшую циклическую стойкость 400 – 1500 циклов. Для материалов с ΔT_{\max} от 72 – 74 К циклическая стойкость уменьшается до 200 – 400 циклов. При этом поддерживался надежный контакт ветвей с коммутационными пластинами, и потому разрывы ветвей всегда происходили по термоэлектрическому материалу. Стандартные ветви размерами $1.4 \times 1.4 \times 1.6$ мм разрываются при сдвигающих нагрузках между 0.5 и 1 кг. При

этом наиболее ярко выражена анизотропия пределов упругости и пределов прочности, находящаяся в соотношении $1:2 \div 1:4$ и существенным образом зависящая от структурного совершенства материалов, ориентации тригональной плоскости и величины кристаллических блоков. Привлекает внимание и то обстоятельство, что между результатами расчетов и результатами испытаний имеется существенное расхождение, хотя качественно эти результаты полностью коррелируют, особенно по анизотропии параметров. Это свидетельствует о том, что в модулях, кроме упругих деформаций, существуют и другие механизмы, которые существенным образом влияют на циклическую стойкость. То обстоятельство, что при циклических испытаниях разрушение ветвей хотя и происходит внутри термоэлектрического материала, но всегда в приконтактной области, качественно свидетельствует о том, что эти области, очевидно, из-за технологических операций, отличаются более низкой механической прочностью. Эти обстоятельства будут предметом дальнейших исследований.

При циклических испытаниях, как правило, разрушению подвергаются периферийные ветви, что соответствует результатам компьютерных расчетов распределения напряжений в модулях. Естественно, что величина циклической стойкости возрастает с уменьшением размеров керамических пластин. Испытания в интервале $0 \div 100^\circ\text{C}$ создают в ветвях деформации сдвига, выходящие за пределы упругости, поэтому были осуществлены меры для уменьшения величины деформации ветвей. Для этого рабочие керамические пластины крепили к коммутационным пластинам теплопроводными резинами толщиной $3 \div 10$ мкм. Демпфирующее действие таких резиновых прокладок позволило улучшить циклическую стойкость модулей более чем в 10 раз. Результатом таких исследований и испытаний было создание конструкции и технологии изготовления модулей повышенной циклической стойкости. Параметры некоторых из них приведены в табл. 3.

Таблица 3

*Характеристики термоэлектрических модулей
повышенной циклической стойкости.*

№ каталога	$T_h = 27^\circ\text{C}$				Размеры (мм)						
	I_{max} (А)	Q_{max} (Вт)	V_{max} (В)	ΔT_{max} (К)	А	В	С	Д	Е	Г	Н
ALTEC-CM-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
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

Гарантированная циклическая стойкость для температурного интервала $0 \div 100^\circ\text{C}$ составила $(10 \div 15)$ тыс. циклов. С уменьшением амплитуды изменения температуры циклическая стойкость резко возрастает до $(150 \div 200)$ тыс. циклов. Существенно то обстоятельство, что параметры ΔT_{max} циклически стойких модулей сохраняются при использовании демпфирующих прослоек, а Q_{max} уменьшается не более чем на 3 %.

Выводы

1. Необходимым условием улучшения надежности является наличие реальной информации о статистике отказов. Такая статистически стабильная информация может быть получена даже при небольших размерах выборки для тестирования. Оптимальный выбор сложной структуры системы позволяет значительно улучшить уровень надежности системы при любом уровне надежности компонентов.
2. Установлена корреляция между совершенством термоэлектрических материалов и циклической стойкостью изготовленных из них модулей. При этом, наиболее ярко выражена анизотропия границ упругости и границ прочности, которая находится в соотношении $1:2 \div 1:4$ и существенным образом зависит от структурного совершенства материалов, ориентации тригональной плоскости и величины кристаллических блоков.

Литература

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. Malysenko, V. P. Mikhilchenko , 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 Zuverlassigkeits 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. Илизавский 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: B. Teubner, (1910, 1928), 1966 (Nachdruck). – 978 p.
19. Nye J. F. *Physical properties of crystals.* – Oxford: Clarendon Press, 1964. – 362 p.

Поступила в редакцию 15.11.2017

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: anatyshuk@gmail.com;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsiubynskyi str.,
Chernivtsi, 58012, Ukraine; e-mail: anatyshuk@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. Bibl. 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., Malysenko V.V., Mikhalechenko V.P. (2003). Povysheniie tsiklicheskoj ustoychivosti 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 Zuverlässigkeits 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). Uprugie 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