

УДК 62-45,608.2



Анатычук Л.И.

Анатычук Л.И., Ницович О.В.

(Институт термоэлектричества, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина)



Ницович О.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В работе приведены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования нового типа поперечных термоэлементов – двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью. Показано, что отклонение рассчитанных и экспериментально полученных значений мощности и поперечной относительно градиента температур термоЭДС составляет не более 6%. Установлено, что использование двухслойных термоэлементов с периодически профилированной поверхностью дает возможность получить большие значения поперечной ЭДС, мощности и КПД по сравнению с анизотропными и короткозамкнутыми термоэлементами.

Ключевые слова: термоЭДС, анизотропный и короткозамкнутый термоэлемент, периодически профилированная поверхность.

In the work the results of computer simulation and experimental research of a new type of transverse thermoelements, i.e. a double-layer thermoelement with a periodically profiled surface are presented. It is shown that the deviation of the computed and experimentally obtained values of power and transverse thermoEMF in relation to temperature gradient is no more than 6%. It has been established that the application of the double-layer thermoelements with the periodically profiled surface makes it possible to obtain big values the transverse thermoEMF, power and efficiency in comparison with anisotropic and short-circuited thermoelements.

Key words: thermoEMF, anisotropic and short-circuited thermoelements, periodically profiled surface.

Введение

Интерес к термопреобразователям поперечного типа возник еще в 70-х годах прошлого века в связи с их привлекательными свойствами – зависимостью поперечной термоЭДС от геометрических размеров термоэлементов и отсутствием коммутаций, для поиска конструкций малоинерционных детекторов излучения. Эти обстоятельства, например, дают возможность с уменьшением толщины термоэлемента повышать их быстродействие без потерь вольт-ваттной чувствительности. Итак, термопреобразователи поперечного типа перспективны для создания быстродействующих термоэлектрических приборов. Однако полупроводниковые материалы, для которых свойственна анизотропия термоЭДС и которые используются для создания анизотропных термоэлементов, имеют сравнительно низкую термоэлектрическую добротность [1-3]. Хотя на их основе можно создать высоковольтные термоэлементы, ЭДС которых определяется соотношением геометрических размеров ориентированных монокристаллов,

мощность, генерируемая единицей объема таких элементов, гораздо меньше, чем у обычных генераторов Зеебека.

Актуальной является проблема поиска новых типов термоэлементов, которые бы позволили улучшить рабочие характеристики термоэлектрических приборов, в частности, путем оптимизации конструкции и режимов работы термоэлементов. Современные компьютерные технологии позволяют провести оптимизацию новых конструкций термоэлементов и выявить их преимущества перед другими типами термоэлементов.

Целью данной работы является экспериментальное исследование термоэлементов нового типа – двухслойных термоэлементов с периодически профилированной поверхностью, а также сравнение результатов экспериментального исследования с результатами компьютерного моделирования.

Моделирование двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью

Физическая модель двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью изображена на рис. 1.

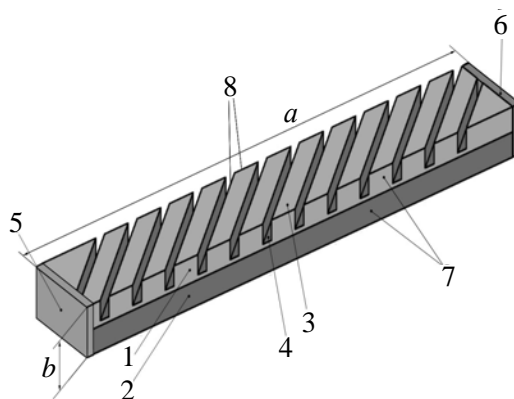


Рис. 1. Двухслойный термоэлемент с периодически профилированной поверхностью [4-5].

1 – материал *p*-типа проводимости; 2 – материал *n*-типа проводимости;

3 – ребра с материала *p*-типа; 4 – пазы с материала *p*-типа;

5, 6 – электрические контакты; 7, 8 – боковые грани термоэлемента,

на которых располагают источники и стоки тепла;

a, *b* – геометрические размеры термоэлемента.

Термоэлемент состоит из материалов *n*- и *p*-типа проводимости. Один из слоев термоэлемента имеет периодическую профильную внешнюю поверхность с системой ребер и пазов, ориентированных под углом к граням бруска 7 и 8, которые термостатированы при различных температурах T_1 и T_2 . Другие внешние стороны термоэлемента находятся в условиях тепловой изоляции. Электрические контакты представляют собой тонкие металлические слои с высокой электропроводностью и потому являются практически эквипотенциальными в пределах одного контакта.

Такая слоистая структура может рассматриваться как искусственно анизотропная среда. Таким образом, наличие перепада температуры между соответствующими гранями 7 и 8 (рис. 1) двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью приводит к возникновению электрического тока и термоЭДС в направлении, перпендикулярном к тепловому потоку. Это явление аналогично поперечному эффекту Зеебека

в анизотропной среде [3]. Как и в анизотропном термоэлементе, величина поперечной ЭДС зависит от отношения геометрических размеров термоэлемента a/b . Однако, в этом случае величина ЭДС будет зависеть еще и от параметров профилированных слоев термоэлемента. Поэтому величина поперечной термоЭДС E_{\perp} может быть представлена в виде:

$$E_{\perp} = \Delta\alpha\Delta T \frac{a}{b} f(\varphi, n), \quad (1)$$

где ΔT – разница температур на термоэлементе, $\Delta\alpha$ – разница коэффициентов Зеебека материалов слоев рабочего тела, $f(\varphi, n)$ – функция от угла наклона замыкающих элементов (ребер) φ к горячей грани термоэлемента и от числа периодов профиля профилированных слоев n на единицу длины термоэлемента a ; b – расстояние между горячей и холодной гранями термоэлемента.

В работах [4-5] приведены результаты многомерной оптимизации данного термоэлемента путем компьютерного моделирования. В основе этой модели лежит метод конечных элементов, который заключается в том, что рабочее тело термоэлемента разбивается на большое количество конечных элементов и в каждом из них ищется значение функции, которое удовлетворяет заданным дифференциальным уравнениям с соответствующими граничными условиями.

Расчеты проводились для термоэлемента из материалов на основе Bi_2Te_3 [4]. Из результатов компьютерного моделирования установлено, что для любой геометрии и термоэлектрических параметров слоев термоэлемента, чем меньше величина d_1/d_2 (рис. 2), тем больше поперечная термоЭДС термоэлемента, а соответственно и его КПД. Поперечная термоЭДС является немонотонной функцией и достигает максимума при определенных значениях "скважности" δ_1/δ_2 (рис. 2) профилированного слоя.

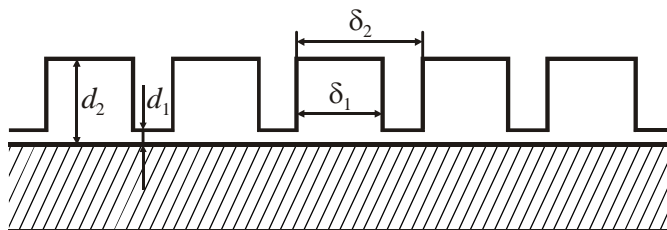


Рис. 2. Геометрические параметры профилированного слоя термоэлемента.

В работах [4-5] было показано, что для любой "скважности" профилированной поверхности поперечная термоЭДС достигает максимального значения, когда величина электропроводности профилированного слоя вдвое больше электропроводности нижнего слоя термоэлемента.

Установлено, что с увеличением отношения толщин профилированного и не профилированного слоев термоэлемента величины ЭДС и мощности увеличиваются. Зависимости ЭДС и электрической мощности термоэлемента от отношения геометрических размеров являются монотонными функциями, которые растут с увеличением величины a/b (рис. 1).

Для проверки результатов компьютерного моделирования и практического подтверждения эффективности двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью было выполнено экспериментальные исследования. Проведённая работа

содержала следующие этапы: синтез термоэлектрических материалов, измерения температурных зависимостей кинетических параметров данных материалов, получения методами экструзии двухслойных стержней, изготовление образцов двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью, измерения ЭДС и мощности полученных двухслойных термоэлементов.

Изготовление двухслойных термоэлементов с периодически профилированной поверхностью

Для изготовления образцов искусственно анизотропных термоэлементов было синтезировано термоэлектрические материалы склада $Bi_2Te_3(75\%) + Bi_2Se_3(25\%)$ и $Bi_2Te_3(30\%) + Sb_2Te_3(70\%)$ (n - и p -типа соответственно).

Следующим шагом было получение двухслойных стержней термоэлектрического материала – заготовок для будущих профилированных термоэлементов – путем термомеханической обработки синтезированного материала. Термомеханическая обработка предусматривает пластическую деформацию (экструзию) заготовок через фильеру с заданным профилем и следующий отжиг стержня. Такая методика позволяет получать калиброванные стержни различного сечения и профиля с равномерным распределением свойств материала по всей его длине.

Таким образом, путем экструзии заготовки, которая состояла из двух равных частей n - и p -типа проводимости (рис. 3, а) получено двухслойные стержни с поперечным сечением $4.1 \times 4.1 \text{ мм}^2$. Внешний вид готовых двухслойных стержней термоэлектрического материала показано на (рис. 3, б).

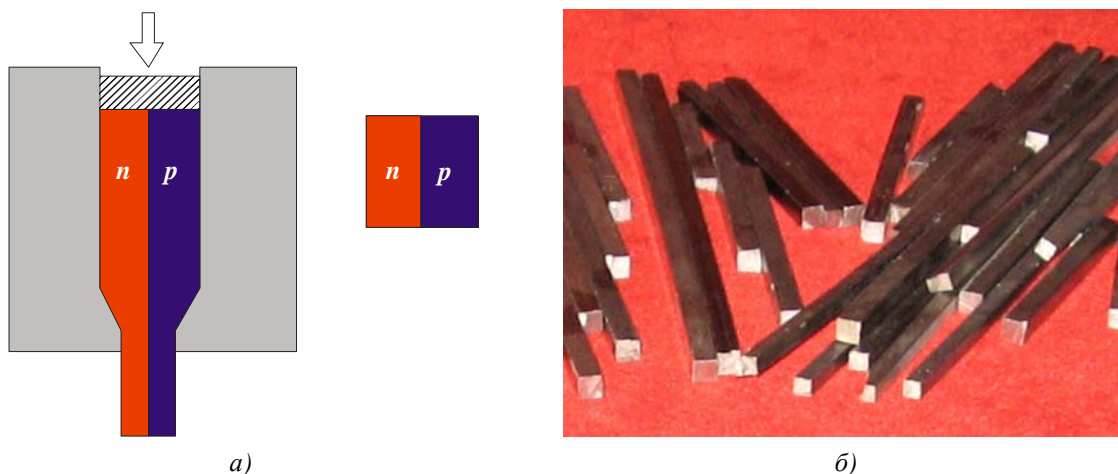


Рис. 3. Схема получения двухслойного стержня термоэлектрического материала путем экструзии (а) и внешний вид стержней (б).

Для определения температурных зависимостей кинетических параметров зон термоэлектрического материала из полученных стержней было вырезано образцы, которые содержат материал только одной из зон. Для полученных образцов n - и p -типов проводимости были измерены температурные зависимости кинетических параметров в интервале температур $290 \div 580 \text{ К}$. Вид этих зависимостей, а также термоэлектрической добротности материала приведены на рисунке 4.

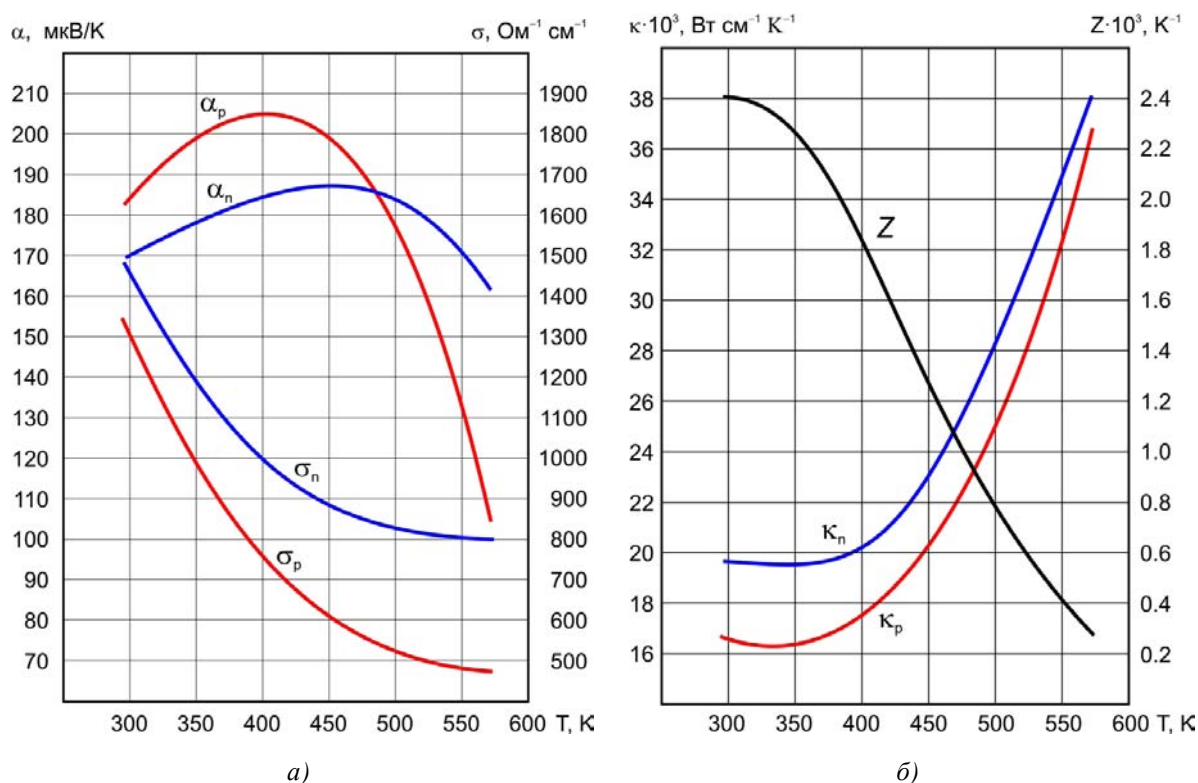


Рис. 4. Температурные зависимости коэффициента термоЭДС, удельной электропроводности, удельной теплопроводности зон и добротности термоэлектрического материала.

Дальнейшая подготовка к изготовлению рабочего тела термоэлемента включала разрез двухслойных стержней на образцы определенной длины, выполнение профилирования одного из слоев образца и шлифовку образцов.

Для проведения экспериментальных исследований двухслойных термоэлементов с периодически профилированной поверхностью было изготовлено образцы с поперечным сечением $4 \times 3.5 \text{ мм}^2$ и длиной 10 мм. Толщина сплошного не профилированного слоя $\delta_1 = 1.5 \text{ мм}$, толщина в профилированном слое $\delta_2 = 0.2 \text{ мм}$, $\delta_3 = 2.3 \text{ мм}$ (рис. 5). Ширина ребра профилированного слоя – 0.24 мм, ширина паза – 0.67 мм

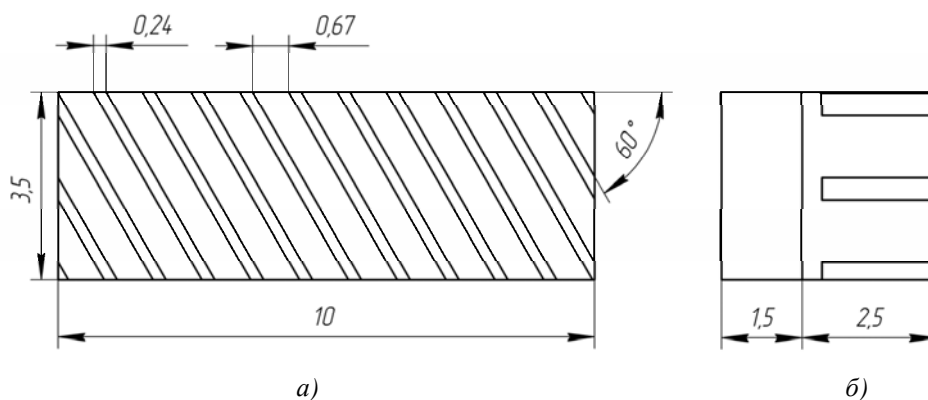


Рис. 5. Фронтальная (а) и боковая (б) проекции профилированного термоэлемента.

Внешний вид готового двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью показан на рис. 6.

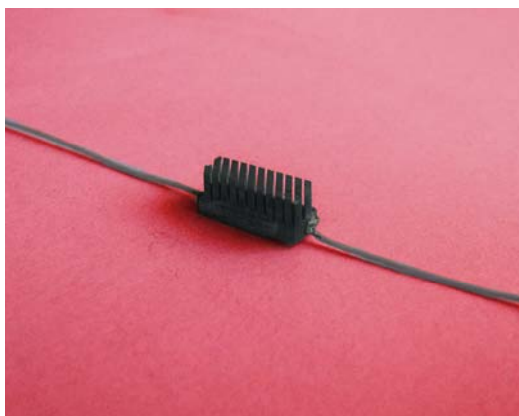


Рис. 6. Двухслойный термоэлемент с периодически профилированной поверхностью.

Схема эксперимента по измерению ЭДС и мощности профилированных термоэлементов

Схему экспериментальной установки для измерения ЭДС и мощности слоистых термоэлементов показано на рис. 7.

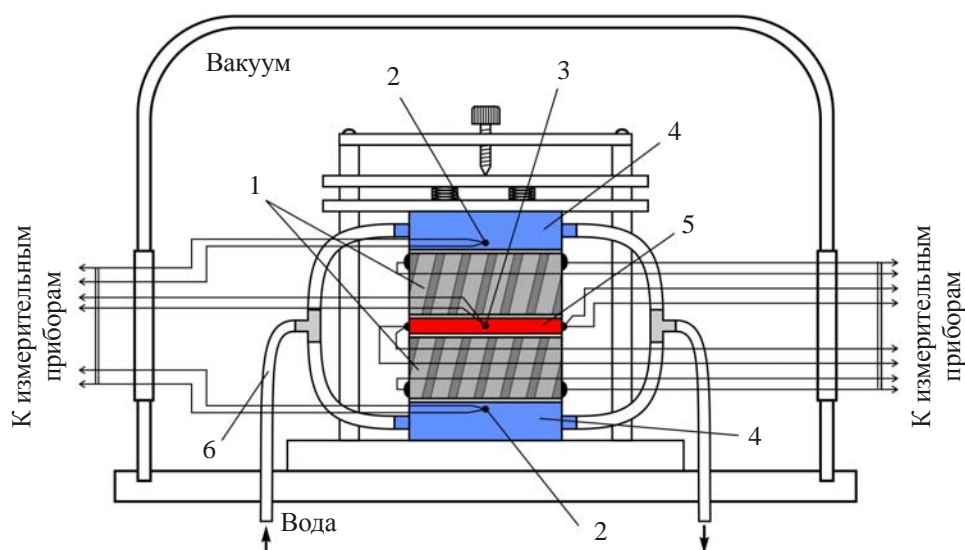


Рис. 7. Схема экспериментальной установки для исследования двухслойных термоэлементов с периодически профилированной поверхностью:

1 – двухслойные термоэлементы, 2 – термопары для контроля температуры холодных граней, 3 – термопара для контроля температуры горячих граней, 4 – теплоотводы, 5 – нагреватель, 6 – магистраль для подачи воды к теплоотводам.

Измерения проводились для двух двухслойных термоэлементов с периодически профилированной поверхностью 1, которые включены в электрическую цепь последовательно. Температура горячих граней термоэлементов задается нагревателем 5 и контролируется термопарой 3. Температура холодных граней контролируется термопарами 2 и задается теплоотводами 4, через которые по магистрали 6 циркулирует вода заданной температуры. Все измерения проводятся в условиях вакуума 10^{-5} мм. рт. ст. На рис. 8 показано установку в процессе проведения эксперимента.

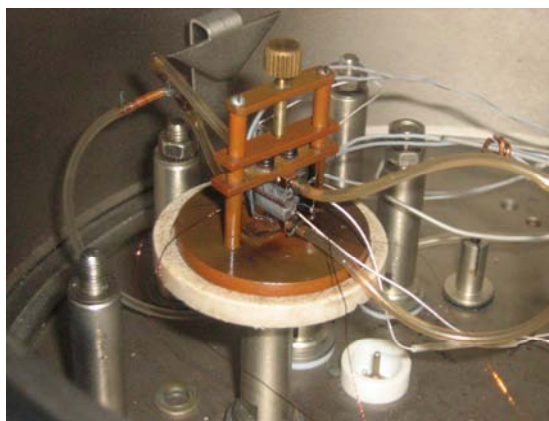


Рис. 8. Установка для измерения ЭДС и мощности двухслойных термоэлементов с периодически профилированной поверхностью.

В ходе исследований измерялись зависимости ЭДС и мощности двухслойных термоэлементов с периодически профилированной поверхностью от температуры горячей грани. Температура холодной грани термоэлемента составляла 290 К. Термоэлектродвижущая сила пары термоэлементов измерялась в ненагруженной цепи.

Результаты экспериментальных исследований двухслойных термоэлементов с периодически профилированной поверхностью

Для определения сопротивления термоэлементов и максимальной мощности W были сняты нагрузочные характеристики. При оптимальной нагрузке термоэлементов фиксировалась электрическая мощность, которая подводится к нагревателю и с учетом тепловых потерь по электрическим проводникам и термопаре, а также излучением с боковых поверхностей нагревателя, определялся тепловой поток Q , проходящий через термоэлементы.

На рис. 9 приведен вид нагрузочных характеристик включенной последовательно пары двухслойных термоэлементов с периодически профилированной поверхностью, полученных на эксперименте.

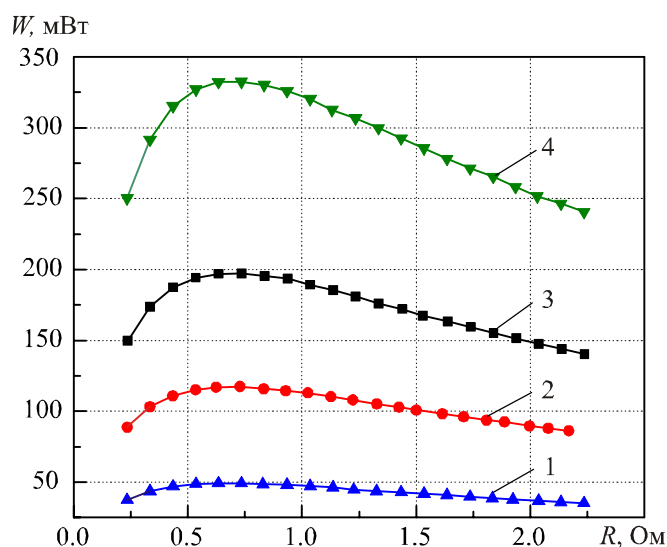


Рис. 9. Нагрузочные характеристики включенной последовательно пары двухслойных термоэлементов с периодически профилированной поверхностью при различных перепадах температур: 1 – $\Delta T=84$ К; 2 – $\Delta T=130$ К; 3 – $\Delta T=185$ К; 4 – $\Delta T=285$ К.

Для сравнения экспериментальных результатов с расчетами компьютерной модели было проведено компьютерное моделирование. В процессе моделирования рассчитано значение поперечной термоЭДС и мощности двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью длиной 20мм., что удовлетворяет условию последовательного соединения двух термоэлементов длиной по 10мм каждый.

Результаты измерения зависимости поперечной термоЭДС от перепада температур на термоэлементе и соответствующих компьютерных экспериментов приведены на рис. 10.

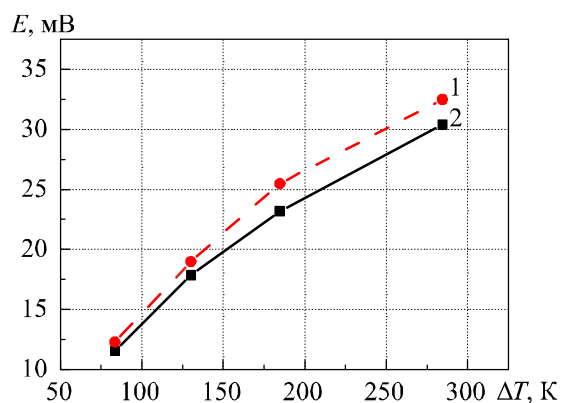


Рис. 10. Зависимость поперечной термоЭДС двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью от перепада температур на термоэлементе:
1 – компьютерный эксперимент,
2 – физический эксперимент.

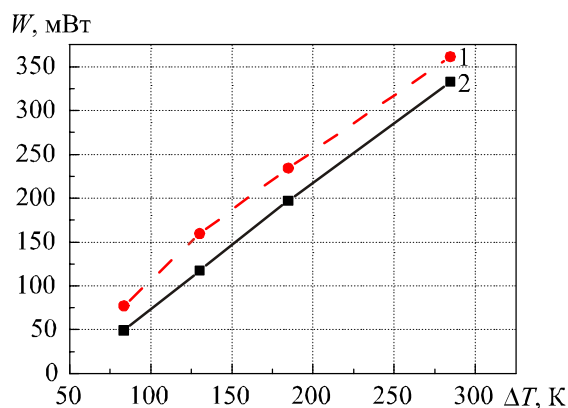


Рис. 11. Зависимость электрической мощности двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью от перепада температур на термоэлементе:
1 – компьютерный эксперимент,
2 – физический эксперимент.

На рис. 11 приведены графики зависимостей мощности двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью термоэлемента от перепада температур на термоэлементе. Отклонение рассчитанных компьютерным моделированием и экспериментально определенных значений мощности составляют не более 6% и лежат в пределах погрешности эксперимента.

Итак, двухслойные термоэлементы с периодически профилированной поверхностью расширяют элементную базу термоэлектричества и являются перспективными для использования в качестве термочувствительных элементов различных теплотрических приборов. Они способствуют развитию и созданию на их основе детекторов излучения, датчиков теплового потока, микрокалориметров, тепломеров.

Выводы

1. Изготовлено двухслойный термоэлемент с периодически профилированной поверхностью, который при перепаде температуры 285 К генерирует поперечную термоЭДС равную 30.4 мВ, при этом мощность – 332 мВ.
2. Экспериментально подтверждены результаты компьютерного моделирования двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью. Показано, что отклонение рассчитанных и экспериментально полученных значений ЭДС и мощности составляет не более 6%.
3. Использование двухслойных термоэлементов с периодически профилированной

поверхностью дает возможность получить большие значения поперечной ЭДС, мощности и КПД по сравнению с анизотропными и короткозамкнутыми термоэлементами. Это расширяет возможности практического применения поперечных термоэлектродвижущих сил.

Литература

1. Голдсמיד Х.Дж. Искусственные поперечные термоэлементы с пористым компонентом // Термоэлектричество. – 2008. – №1. – С. 7–12.
2. Голдсמיד Х.Дж. Материалы для искусственных поперечных термоэлектрических приборов // Термоэлектричество. – 2008. – №4. – С. 42–51.
3. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
4. Анатычук Л.И., Лусте О.Я., Ницович О.В. Компьютерное моделирование процессов преобразования энергии в двухслойном термоэлементе с периодически профилированной поверхностью // Термоэлектричество. – 2007. – №2. – С. 77–84.
5. Анатычук Л.И., Лусте О.Я., Ницович О.В. Температурные зависимости параметров двухслойного термоэлемента с периодически профилированной поверхностью // Термоэлектричество. – 2008. – №2. – С. 7–14.

Поступила в редакцию 26.02.2015.