

УДК 53.082

Анатычук Л.И.^{1,2}, Гаврилюк Н.В.¹, Лысько В.В.¹, Тюменцев В.А.³

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

²Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина

³НПО «ВЛАНТ», Черновцы, Украина

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ СТЕРЖНЕЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В работе приведены результаты разработки оборудования для измерения распределений электропроводности и термоЭДС вдоль стержней термоэлектрических материалов. Приведен анализ отклонений реальной физической модели измерительного оборудования от идеальной модели метода измерений, а также результаты расчетов погрешностей измерений, вызванных этими отклонениями. Разработан метод измерения теплопроводности стержней. Приведено описание конструкции измерительного оборудования с автоматизацией процесса измерений для повышения быстродействия и исключения субъективных погрешностей. Использование такого оборудования при изготовлении термоэлектрических модулей позволяет сократить расход термоэлектрического материала до ~ 10% при одновременном повышении качества термоэлектрической продукции на ~ 8 – 15%.

Ключевые слова: электропроводность, теплопроводность, термоЭДС, погрешность, термоэлектрический материал, автоматизация.

The paper presents the results of development of equipment for measurement of electric conductivity and thermopower distributions along thermoelectric material rods. The deviations of a real physical model of measuring equipment from the ideal model of measuring method, as well as the results of calculation of measurement errors caused by these deviations are analyzed. The method for measurement of thermal conductivity of rods is developed. A description of measuring equipment design with automation of measurement process to increase the rapidity of action and eliminate human errors is given. The use of such equipment in the manufacture of thermoelectric modules allows reducing thermoelectric material consumption to ~ 10% with a simultaneous quality enhancement of thermoelectric products by ~ 8 – 15%.

Key words: electrical conductivity, thermal conductivity, thermoelectric power, accuracy, probe, thermoelectric material, automatization.

Введение

Общая характеристика проблемы. Важным при производстве термоэлектрических модулей является пошаговый контроль качества термоэлектрических материалов. Не менее важным является выбор материала с заданными свойствами, оптимизированными для каждой конкретной задачи. Первым этапом такого контроля является измерение свойств стержней термоэлектрического материала.

Анализ литературы. Для измерения электропроводности стержней успешно используется двухзондовый метод [1]. В работах [2-5] приведен детальный анализ источников погрешностей этого метода и предложены пути их минимизации.

Для определения коэффициента термоЭДС стержней обычно используется метод горячего зонда [6], позволяющий находить локальное значение термоЭДС в точке, контактирующей с зондом.

В работе [7] приведено описание разработанной в Институте термоэлектричества (Украина) экспериментальной установки для определения электропроводности и термоЭДС стержней. Погрешности измерения данной установки составляют ~ 1% для электропроводности и ~ 2% для коэффициента термоЭДС. Недостатком такого оборудования является ручной режим проведения измерений и обработки их результатов.

Целью настоящей работы является разработка оборудования для измерения свойств стержней термоэлектрических материалов путем использования автоматизации перемещения измерительных зондов, обработки результатов измерения и построения графиков распределения свойств материала в стержне.

Физическая, математическая и компьютерная модели метода

Физическая модель для разработки методик определения электропроводности и коэффициента термоЭДС стержней приведена на рис. 1. Для измерения электропроводности использован двухзондовый метод, для определения коэффициента термоЭДС – метод горячего зонда. В физической модели учтены охлаждение и нагрев противоположных краев слитка под действием тепла Пельтье Q_1 , выделение тепла Джоуля Q_2 в слитке и токоподводах, а также теплообмен слитка, токоподводов и измерительных зондов с окружающей средой ($Q_3 - Q_{11}$).

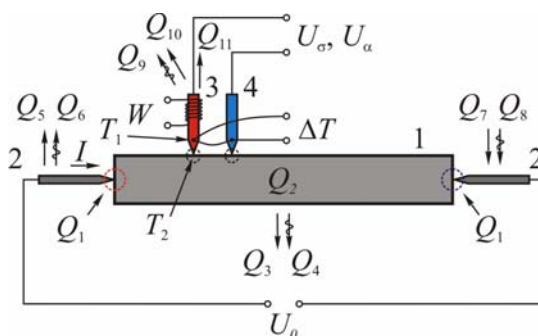


Рис. 1. Физическая модель измерения электропроводности и коэффициента термоЭДС слитков.

1 – слиток, 2 – токоподводы, 3, 4 – измерительные зонды.

Для расчета погрешностей и оптимизации методики измерения необходимо найти распределения электрического потенциала φ и температуры T в слитке, которые можно получить, исходя из законов сохранения электрического заряда и энергии, записанных в виде:

$$\begin{cases} -\nabla((\kappa_j + \alpha_j^2 \sigma_j T + \alpha_j \varphi \sigma_j) \nabla T) - \nabla((\alpha_j \sigma_j T + \varphi \sigma_j) \nabla \varphi) = 0, \\ -\nabla(\sigma_j \nabla \varphi) - \nabla(\sigma_j \alpha_j \nabla T) = 0. \end{cases} \quad (j=1...10), \quad (2)$$

где: α_i , σ_i , κ_i – коэффициенты термоЭДС, электропроводности и теплопроводности элементов физической модели.

Граничные условия для такой физической модели:

- боковые поверхности слитка и токоподводов электрически изолированы

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{j} = 0 ;$$

- через токоподводы протекает ток величиной I

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{j} = I / S_{cm} ;$$

- концы токоподводов термостатированы при температуре окружающей среды T_0

$$T = T_0 ;$$

- боковые поверхности слитка, измерительных зондов и токоподводов находятся в состоянии теплообмена с окружающей средой

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = h_n (T_0 - T),$$

где h_n – коэффициенты теплоотдачи.

Для расчета такой задачи использовано компьютерное объектно-ориентированное моделирование путем применения метода конечных элементов, реализованного в пакете прикладных программ Comsol Multiphysics.

Основные источники погрешностей при измерениях электропроводности:

- неоднородность плотности тока в слитке из-за подвода тока к торцу слитка не равномерно по всей его поверхности, а только в местах контакта с токоподводами;
- неизотермические условия, вызванные влиянием эффектов Пельтье и Джоуля, а также теплообменом с окружающей средой.

Было установлено, что погрешности, вызванные неоднородностью плотности тока, вблизи торцов могут быть значительными – более 45% в случае, когда для подвода тока к слитку используют по одному точечному токоподводу на каждом из торцов (рис. 2).

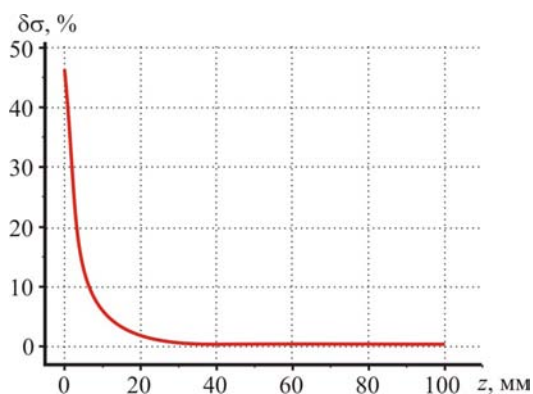


Рис. 2. Зависимость погрешности измерения электропроводности, вызванной неоднородностью плотности тока, от расстояния z от зондов до края слитка

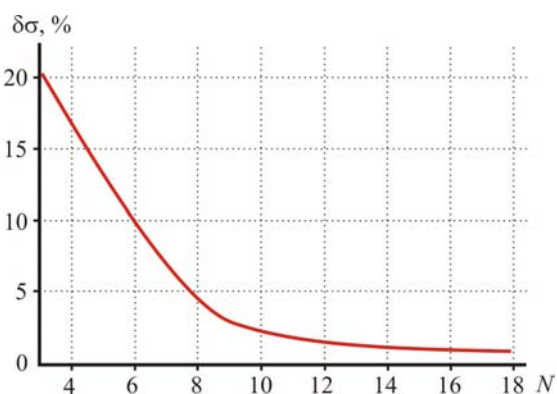


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения электропроводности, вызванной неоднородностью плотности тока, от количества токовых контактов N

Ситуация улучшается при увеличении числа токоподводов (рис. 3). Для случая трех точек погрешность составляет около 20%. Компьютерное моделирование позволило определить оптимальное количество точек контакта – 16 на каждом из торцов. Погрешность измерения, вызванная неоднородностью плотности тока, при этом уменьшается до 0.9%.

Разработан также метод устранения влияния эффекта Пельтье путем использования оптимального тока через слиток, при котором охлаждающее действие эффекта Пельтье компенсируется теплом Джоуля. Погрешность при этом уменьшается от 6 до 0.3% (рис. 4).

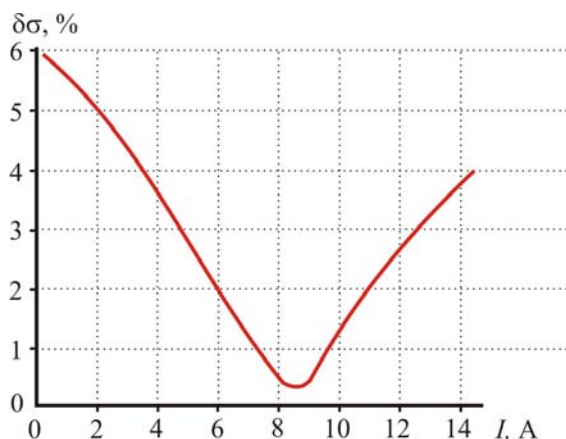


Рис. 4. Зависимость погрешности измерения электропроводности, вызванной влиянием эффекта Пельтье, от расстояния от тока через слиток.

Общая погрешность измерения электропроводности, с учетом инструментальных погрешностей, составляет 1.5%. Таким образом, разработанными методами достигнуто повышение точности измерений электропроводности вблизи торцов более чем в 15 раз.

Погрешности при определении коэффициента термоЭДС возникают из-за различия между температурой T_1 в месте расположения термопары на зонде и температурой T_2 в месте контакта зонда с поверхностью стержня. Компьютерным моделированием были получены зависимости поправочного коэффициента K от геометрии измерительного зонда для учета этой разности температур при расчете коэффициента термоЭДС

$$\alpha = \frac{U_\alpha}{K(T_1 - T_0)}$$

Использовался зонд с коническим острием. Диаметр основания зонда d_1 , диаметр острия зонда – d_2 . На рис 5, 6 приведены зависимости поправочного коэффициента K от размеров зонда для случаев медного (1) и вольфрамового (2) острия.

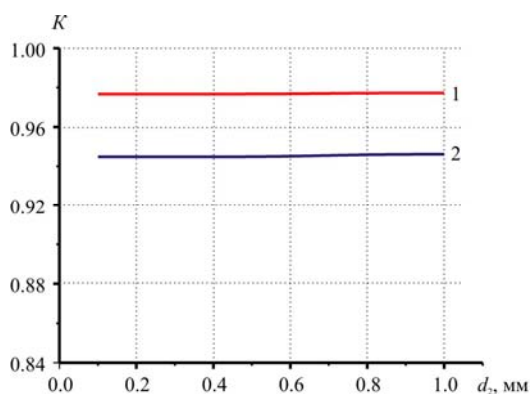


Рис. 5. Зависимость поправочного коэффициента для расчета коэффициента термоЭДС слитка от диаметра острия зонда.

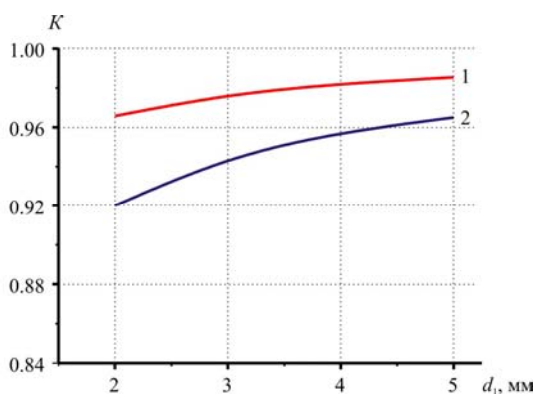


Рис. 6. Зависимость поправочного коэффициента для расчета коэффициента термоЭДС слитка от диаметра основания зонда.

Разработана также методика измерения теплопроводности слитков. Для этого была изучена компьютерная модель, которая позволяет находить распределения температуры в слитке в произвольный момент времени. Рассматривался слиток термоэлектрического материала, на одной с торцевых граней которого расположен электрический нагреватель.

Уравнение для нахождения распределения температуры имеет вид:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-\kappa \nabla T) = 0 \quad (3)$$

где ρ – плотность, C – теплоемкость, κ – теплопроводность материала слитка.

Решение уравнения (3) с граничными условиями, учитывающими теплообмен слитка с окружающей средой, позволило получить градуировочные кривые для определения коэффициента теплопроводности материала из времени достижения заданного перепада температур между двумя точками на поверхности слитка (рис. 7).

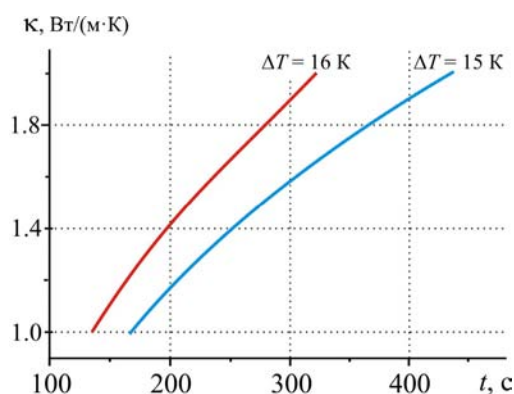


Рис. 7. Градуировочные зависимости для определения теплопроводности слитка.

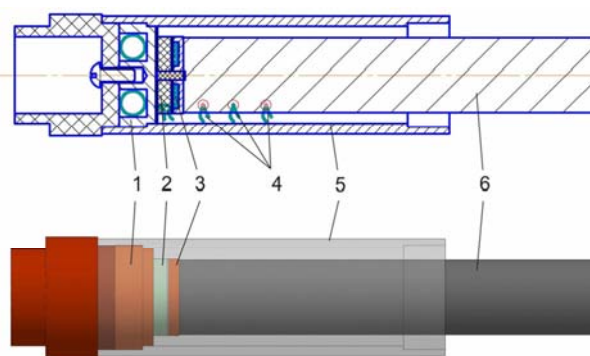


Рис. 8. Конструкция устройства для определения теплопроводности слитков.

Устройство для определения теплопроводности и его внешний вид приведены на рис. 8. Оно содержит эталонный нагреватель 3, термопары-зонды 4, экранный нагреватель 1, дифференциальную «ноль-термопару» 2 и экранную трубку 5. Теплопроводность определяется по скорости достижения заданного перепада температуры между термопарами.

На основе описанных методов было разработано оборудование для исследования свойств слитков, внешний вид которого приведен на рис. 9. Оборудование полностью автоматизировано, включая перемещение зондов и поворот слитка вокруг своей оси, а также процесс измерений и обработки результатов.

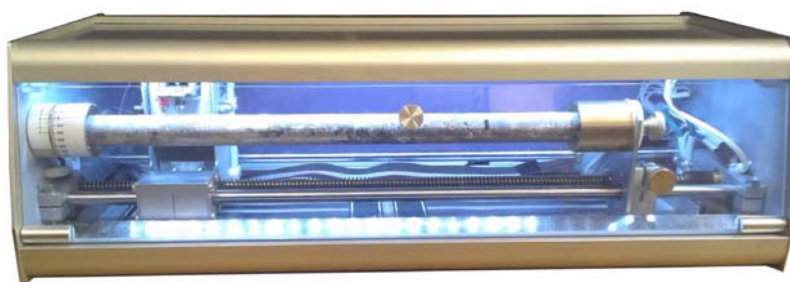


Рис. 9. Внешний вид держателя слитка.

Совместно с государственным предприятием «Черновицкий региональный научно-производственный центр стандартизации, метрологии и сертификации» (ГП «Буковинастандартметрология») были разработаны методики метрологической аттестации данного оборудования и проведены испытания, позволившие подтвердить его высокую точность и воспроизводимость результатов: погрешность не более 0.5% при измерении

электропроводности и не более 1% при измерении термоЭДС; погрешность при определении теплопроводности не более 10%.

Разработанное оборудование для определения свойств стержней может быть полезным при производстве термоэлектрических модулей. Его использование позволяет достигнуть экономии материала около 10%, а также повышает качество модулей на 8-15%.

Выводы

1. Методами компьютерного моделирования определено влияние различных погрешностей на точность измерения электропроводности и термоЭДС стержней термоэлектрических материалов. Найдены условия для минимизации влияния этих погрешностей.
2. Опираясь на результаты компьютерного моделирования разработана автоматизированная установка для измерения электропроводности и термоЭДС стержней, а также автоматической обработки результатов измерений. Погрешность при измерении электропроводности ~ 0.5%, термоЭДС ~1%.
3. Измерительная установка снабжена устройством для определения теплопроводности стержня в динамическом режиме. Погрешность при определении теплопроводности ~10%.
4. Применение описанного измерительного оборудования в производственной практике при изготовлении модулей охлаждения позволяет уменьшить расход термоэлектрического материала до 10% и улучшить качество модулей до 8-15%.

Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. – К.: Наук. думка, 1978. – 768 с.
2. Разиньков В.В. Оборудование для определения параметров слитков термоэлектрических материалов // Термоэлектричество. – 2002, №4. – С. 70-79.
3. Лысько В.В. Исследование погрешностей измерения электропроводности стержней термоэлектрического материала // Термоэлектричество. – 2006, №4. – С. 49-54.
4. Анатычук Л.И., Лысько В.В. Высокоточный метод измерения электропроводности стержней термоэлектрических материалов // Термоэлектричество – 2008, №1. – С. 70-75.
5. Анатычук Л.И., Лысько В.В. Измерение термоэлектрических параметров на стержнях. Сб. докладов XI межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применения». – Санкт-Петербург, 2008. – С. 464-469.
6. Охотин А.С., Пушкарский А.С., Боровикова Р.П., Симонов В.А. Методы измерения характеристики термоэлектрических материалов и преобразователей. – М.: Наука, 1974. – 167с.
7. Anatyshuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials// Journal of Electronic Materials. – 2012, Vol. 41, № 6, p. 1680-1685.

Поступила в редакцию 10.09.2015.