



Анатычук Л.И.

О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОЭДС ЗОНДОВЫМ МЕТОДОМ

Анатычук Л.И., Мочернюк Р.Н.
(Институт термоэлектричества,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина)



Мочернюк Р.Н.

- Создана компьютерная модель измерения коэффициента термоЭДС методом горячего зонда, которая позволяет исследовать погрешности измерения, вызванные вихревыми токами, теплопроводностью образца и диаметром конца остря.

Введение

Общая характеристика проблемы. Точность измерения параметров физических величин является важной проблемой современной науки. Для рационального использования термоэлектрических материалов (ТЭМ) и создания точных термоэлектрических приборов необходимо контролировать качество ТЭМ. Для этого проводятся измерения основных параметров материала, в частности и коэффициента термоЭДС.

Анализ литературы. Для определения коэффициента термоЭДС чаще всего используются стационарные методы измерения на образцах правильной геометрической формы, в частности метод горячего зонда [1]. Перепад температуры, как правило, составляет 10 – 15 К. Коэффициент термоЭДС определяется из соотношения:

$$\alpha = \frac{E}{\Delta T}, \quad (1)$$

E – ЭДС, возникающая в образце под действием перепада температур ΔT .

Метод горячего зонда заключается в том, что на поверхности образца располагается нагретый зонд, которым осуществляется локальный разогрев образца. Это приводит к возникновению термоЭДС, которую измеряют относительно другого зонда, размещенного за пределами нагретой области [1].

В работе [2] описана установка, которая позволяет определять термоЭДС на разных участках образца. С помощью этого метода можно получить информацию о наличии примесей в образце. Метод базируется на том, что по поверхности образца передвигается нагретый до определенной температуры зонд, в который вмонтирована термопара. Вследствие нагрева участка образца в нем возникает термоЭДС, которая фиксируется относительно другого, недвижимого зонда.

В работе [3] проведено исследование по измерению α пленок с использованием термозонда. Были проведены расчеты распределения температур, а также исследована зависимость термоЭДС от диаметра зонда.

В общем случае точность определения α составляет 2 – 5% [1], а воспроизводимость результатов – приблизительно 10% [2].

Однако к настоящему времени не проведены исследования о влиянии теплопроводности образца, вихревых токов, размера контакта и геометрии зонда на точность измерения α .

Поэтому *цель данной работы* заключается в исследовании влияния этих факторов на точность определения коэффициента термоЭДС зондовым методом.

Физическая модель

Для исследования погрешностей, которые возникают при измерении α методом горячего зонда необходимо найти распределение температуры и потенциала в зонде и образце. Для этого нужно построить физическую модель.

Физическая модель состоит из термоэлектрического материала произвольной формы 1 и конусного зонда 2. Образец термоэлектрического материала находится на термостате, который поддерживает температуру на нижней грани образца T_1 . Верхняя грань зонда поддерживается при температуре T_2 . Боковые поверхности зонда и образца термо- и электроизолированы (рис 1).

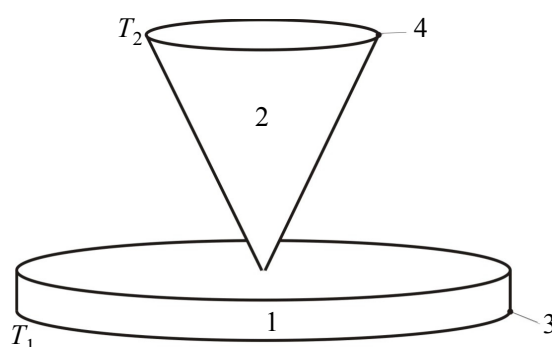


Рис. 1. Физическая модель измерения коэффициента термоЭДС.

Перепад напряжения, который возникает в образце вследствие наличия перепада температур между верхней и нижней гранями образца, измеряется между двумя точками 3 (потенциал $U = 0$) и 4 (рис 1).

Математическая и компьютерная модель

Моделирование тепловых потоков в зонде проведем в программе Femlab. Для этого предварительно была построена математическая модель, на основе которой описаны распределения температуры, потенциала и токов в зонде и образце.

Уравнение распределения физических полей в термоэлементе были получены из законов сохранения энергии

$$\operatorname{div} \vec{W} = 0, \quad (2)$$

и электрического заряда

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (3)$$

где

$$\vec{W} = \vec{q} + U\vec{j} \quad (4)$$

$$\vec{q} = \kappa \vec{\nabla} T + \alpha T \vec{j} \quad (5)$$

$$\vec{j} = -\sigma \vec{\nabla} U - \sigma \alpha \vec{\nabla} T \quad (6)$$

\vec{W} – плотность потока энергии, \vec{j} – плотность электрического тока, U – электрический потенциал, T – температура, α , σ , κ – коэффициенты термоЭДС, удельных электропроводности и теплопроводности. Поскольку перепад температуры в образце не значителен (10 К), то температурная зависимость кинетических коэффициентов не учитывалась.

Учтя в (4) выражения (5), (6) получим:

$$\vec{W} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \vec{\nabla} T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \vec{\nabla} U. \quad (7)$$

Тогда законы сохранения (2), (3) приобретают вид:

$$-\vec{\nabla} [(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \vec{\nabla} T] - \vec{\nabla} [(\alpha \sigma T + U \sigma) \vec{\nabla} U] = 0, \quad (8)$$

$$-\vec{\nabla} (\sigma \alpha \vec{\nabla} T) - \vec{\nabla} (\sigma \vec{\nabla} U) = 0. \quad (9)$$

Уравнения (8) и (9) – это дифференциальные уравнения второго порядка в частных производных для искомым функций U и T .

Следующим шагом моделирования было возведение дифференциальных уравнений (7) и (8) до одной из стандартных форм (10) программы Femlab.

$$\nabla(-C \nabla M) = 0, \quad (10)$$

где
$$M = \begin{bmatrix} U \\ T \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \nabla(-C_{11} \nabla U) + \nabla(-C_{12} \nabla T) &= 0 \\ \nabla(-C_{21} \nabla U) + \nabla(-C_{22} \nabla T) &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} C_{11} &= \alpha \sigma T + U \sigma \\ C_{12} &= \kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha \sigma U \\ C_{21} &= \sigma \alpha \\ C_{22} &= \sigma \end{aligned} \quad (13)$$

(13) – коэффициенты для компьютерной программы Femlab.

Результаты компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование проводилось с помощью программы Femlab. Получены распределения температурного (рис. 2) и потенциального полей (рис. 3), что создаются в исследуемом образце и термозонде.

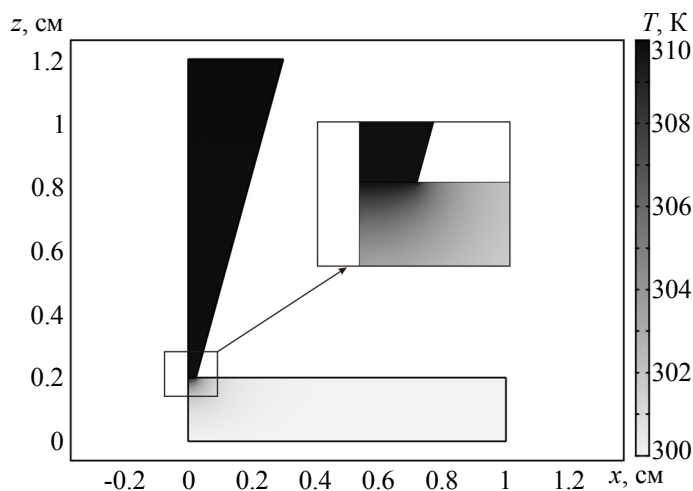


Рис. 2. Распределение температуры в зонде и образце.

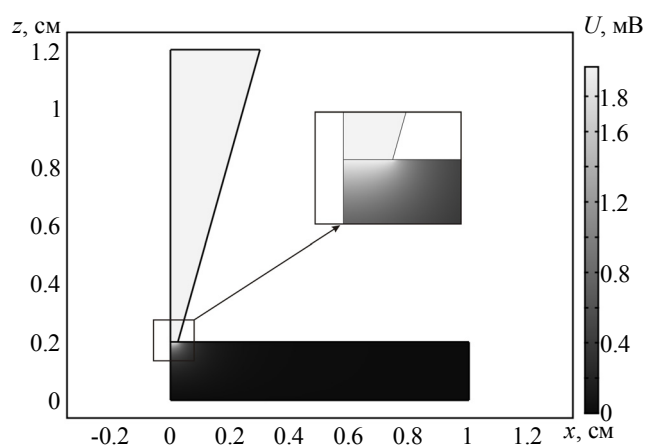


Рис. 3. Распределение потенциала в зонде и образце.

Влияние теплопроводности образца

Следующим шагом моделирования было исследование влияния теплопроводности образца на точность измерения коэффициента термоЭДС α . Рассмотрен широкий диапазон теплопроводности от $0.001 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ до $4 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ для разных диаметров зонда. Распределения температурного поля в зонде приведены на рис. 4 – 6, влияние теплопроводности – в таблице 1.

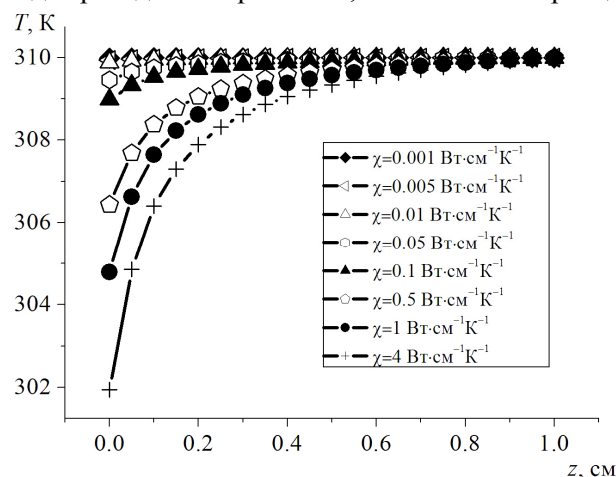


Рис. 4. Распределение температуры вдоль оси зонда при разных значениях теплопроводности образца. Диаметр острия зонда 0.5 мм.

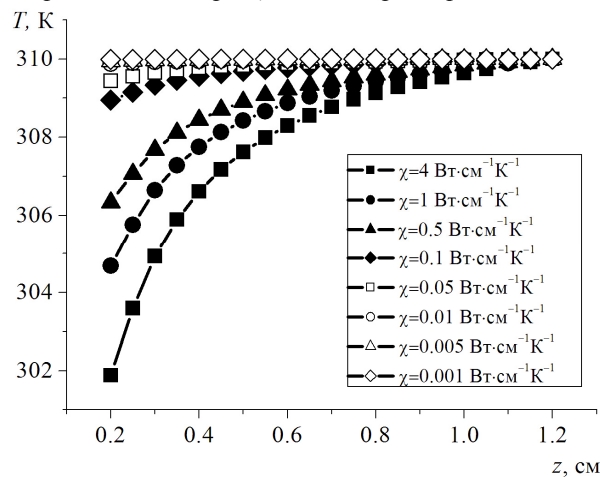


Рис. 5. Распределение температуры вдоль оси зонда при разных значениях теплопроводности образца. Диаметр острия зонда 1 мм.

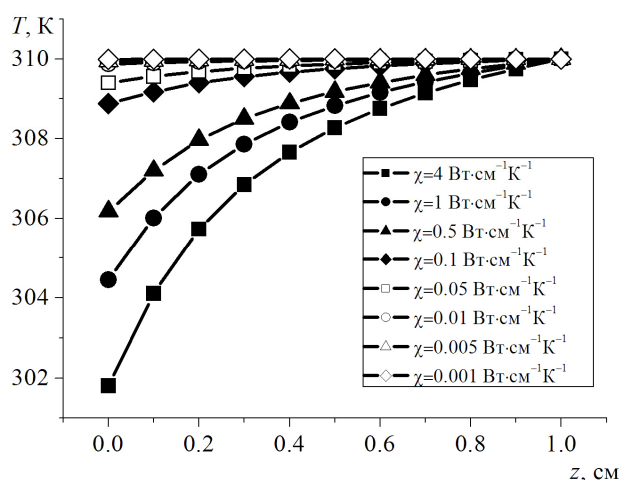


Рис. 6. Распределение температуры вдоль оси зонда при разных значениях теплопроводности образца. Диаметр острия зонда 1.5 мм.

Таблица 1

Зависимость разности потенциалов и температуры на границе "зонд – образец" от теплопроводности исследуемого образца ($\alpha = 200$ мкВ/К, диаметр зонда 0.5 мм)

№п/п	χ , Вт·см ⁻¹ ·К ⁻¹	Температура на границе "зонд-образец", К	E, мкВ	Погрешность, %
1	4	301.946	374	81.3
2	1	304.788	911	54.5
3	0.5	306.436	1251	37.5
4	0.1	308.386	1786	12.7
5	0.05	309.465	1887	5.7
6	0.01	309.888	1976	1.2
7	0.005	309.943	1988	0.6
8	0.001	309.988	1998	0.1

Анализ полученных результатов показывает, что при измерении α зондовым методом образцов с большой теплопроводностью происходит значительное рассеяние тепла. В результате этого погрешности при измерении коэффициента термоЭДС могут достигать 80%. Это обстоятельство нужно учитывать при измерении α в образцах с большой теплопроводностью.

Дополнительные исследования влияния диаметра конца острия на величину погрешности показали, что изменение диаметра в пределах 0.1 – 1 мм не приводит к уменьшению погрешности измерения коэффициента термоЭДС термозондом.

Влияние вихревых токов

В результате моделирования установлено, что в области контакта "зонд – образец" возникают вихревые термоэлектрические токи (рис. 7).

Учитывая это, исследовано влияния таких токов на точность измерения α . Для этого проведено сравнение термоЭДС, которая возникала в образце с учетом вихревых токов с термоЭДС, рассчитанной по формуле (1) при известной температуре конца острия зонда. Исследования проводились для разных параметров материала. Полученные результаты приведены в таблице 2.

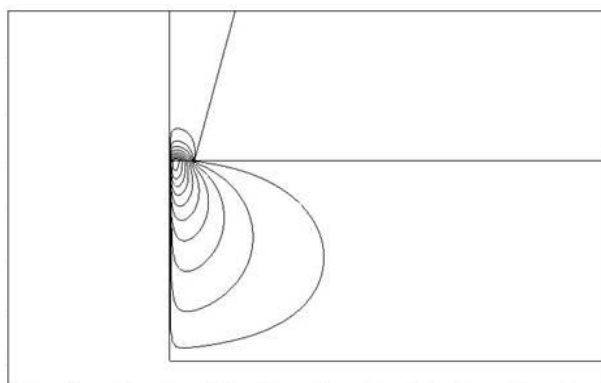


Рис. 7. Вихревые термоэлектрические токи, которые возникают на контакте "зонд – образец".

Таблица 2

Влияние вихревых токов на точность измерения α методом горячего зонда

№	α , мкВ/К	σ , Ом ⁻¹ см ⁻¹	χ , Вт·см ⁻¹ К ⁻¹	$E_{вс}$, мкВ	E , мкВ	ΔE , мкВ.	Погрешность, %
1	200	1000	0.014	1997.4	1997.56	0.16	0.01
2	100	10000	0.2	806.5	816.70	10.20	1.25
3	50	100000	0.4	339.4	345.95	6.55	1.89

Как видно из таблицы, погрешность обусловленная влиянием вихревых токов возрастает при измерении α образцов с большой электропроводностью.

Влияние материала зонда и угла у его основания на распределение температурного поля

Осуществлен расчет влияния материала зонда и угла при его основе на рассеяние тепла при измерении коэффициента термоЭДС методом горячего зонда. Исследования проводились для двух материалов зонда: меди и вольфрама. Результаты измерения представлены на рис. 8 и рис. 9.

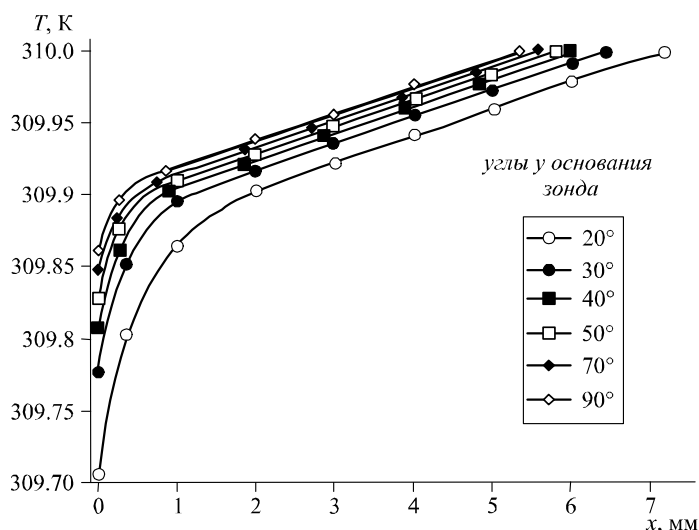


Рис. 8. Распределение температуры вдоль медного зонда с диаметром конца острия 0.2 мм для разных углов у основания зонда.

На приведенных графиках представлено распределение температуры в зонде в зависимости от угла у его основания для вольфрама и меди при диаметре конца острия 0.2 мм. Показано, что вольфрамовый зонд имеет втрое большие потери по сравнению с медным. Так что в качестве материала зонда целесообразнее использовать медь.

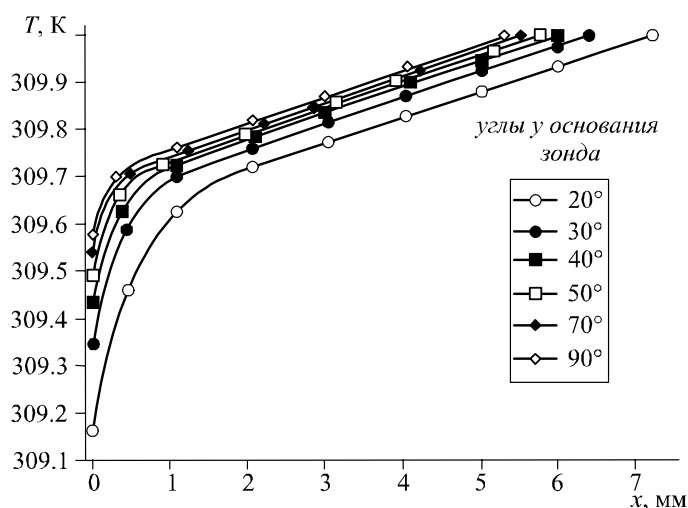


Рис. 9. Распределение температуры вдоль вольфрамового зонда с диаметром конца острья 0.2 мм для разных углов у основания зонда.

Установлено, что при угле 40° и больше кривые мало отличаются, что дает возможность определить оптимальный угол при вершине зонда.

Выводы

1. Создана компьютерная модель измерения коэффициента термоЭДС, что дало возможность найти распределения температуры, потенциала и токов в зонде и образце термоэлектрического материала.
2. Установлено, что изменение диаметра зонда измерительной установки в пределах 0.1 – 1 мм не влияет на точность определения α .
3. Показано, что при измерении α образцов с большой теплопроводностью наблюдается значительное искажение температурного поля в зонде, в результате чего погрешности при измерении коэффициента термоЭДС могут достигать 80%.
4. Установлено, что при измерении α образцов с большой электропроводностью погрешность обусловленная влиянием вихревых токов возрастает до 2%.
5. Исследовано влияние материала зонда на распределение температурного поля в образце. Установлено, что зонд должен быть изготовлен из материала с высокой теплопроводностью (например, медь).

Искренняя признательность О.Я. Лусте и Р.В. Кузю за консультации и помощь при создании компьютерной модели.

Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: [справочник] / Анатычук Л.И. – Киев: Наук. думка, 1979. – 768 с.
2. Охотин А.С. Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей / А.С. Охотин, А.С. Боровикова, В.А. Симонов – М: Наука, 1974. – 167с.
3. Измерение термоЭДС эпитаксиальных пленок термозондом / Л.И. Анатычук, В.Т. Димитрашук, О.Я. Лусте [и др.] // Известия высших учебных заведений, Физика. – 1971. – №9.
4. Вайнер А.Л. Термоэлектрические параметры и их измерение / А.Л. Вайнер. – Одесса: Студия "Негоциант", 1998. – 68 с.
5. Разиньков В.В. Оборудование для определения параметров слитков термоэлектрических материалов / В.В. Разиньков // Термоэлектричество. – 2002. – №4. – С. 70 – 79.

Поступила в редакцию 01.07.2012.