



Анатичук Л.І.

**ПРО ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ
ТЕРМОЕРС ЗОНДОВИМ
МЕТОДОМ**

*Анатичук Л.І., Мочернюк Р.М.
(Інститут термоелектрики,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна)*



Мочернюк Р.М.

- Створено комп'ютерну модель вимірювання коефіцієнта термоЕРС методом гарячого зонда, яка дає можливість дослідити похибки вимірювання, що спричинені вихровими струмами, теплопровідністю зразка та діаметром кінця вістря.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Точність вимірювання параметрів фізичних величин – важлива проблема сучасної науки. Для раціонального використання термоелектричних матеріалів (ТЕМ) та створення точних термоелектричних приладів необхідно контролювати якість ТЕМ. Для цього здійснюється вимірювання основних параметрів матеріалу, зокрема й коефіцієнта термоЕРС.

Аналіз літератури. Для визначення коефіцієнта термоЕРС найчастіше використовуються стаціонарні методи вимірювання на зразках правильної геометричної форми, зокрема метод гарячого зонда [1]. Перепад температури, здебільшого становить 10 – 15 К. Коефіцієнт термоЕРС визначається із співвідношення

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

де E – ЕРС, що виникає в зразку під дією перепаду температур ΔT .

Метод гарячого зонда полягає в тому, що на поверхні зразка розташовується нагрітий зонд, яким здійснюється локальний розігрів зразка. Це призводить до виникнення термоЕРС, яку вимірюють відносно іншого зонда, розміщеного за межами нагрітої області [1].

У праці [2] описано установку, яка дає можливість визначати термоЕРС на різних ділянках зразка. З допомогою цього метода можна отримати інформацію про наявність домішок у зразку. Метод базується на тому, що по поверхні зразка пересувається нагрітий до певної температури зонд, у який вмонтована термопара. Внаслідок нагріву ділянки зразка в ньому виникає термоЕРС, яка фіксується відносно іншого, нерухомого зонда.

У праці [3] здійснено дослідження з вимірювання α плівок з використанням термозонда. Проведено розрахунок розподілу температур, а також досліджено залежність термоЕРС від діаметра зонда.

В загальному випадку точність визначення α становить 2 – 5% [1], а повторюваність результатів – приблизно 10% [2].

Однак до цього часу не проведено дослідження впливу теплопровідності зразка, вихрових струмів, розміру контакту та геометрії зонда на точність вимірювання α . Тому мета пропонованої праці полягає в дослідженні впливу цих факторів на точність визначення коефіцієнта термоЕРС зондовим методом.

Фізична модель

Для дослідження похибок, що виникають під час вимірювання α методом гарячого зонда необхідно знайти розподіл температури та потенціалу в зонді та зразка. Для цього потрібно побудувати фізичну модель.

Фізична модель складається з термоелектричного матеріалу довільної форми 1 та конусного зонда 2. Зразок термоелектричного матеріалу знаходиться на термостаті, що підтримує температуру на нижній грані зразка T_1 . Верхня грань зонда підтримується за температури T_2 . Бічні поверхні зонда та зразка термо- та електро-ізовані (рис 1).

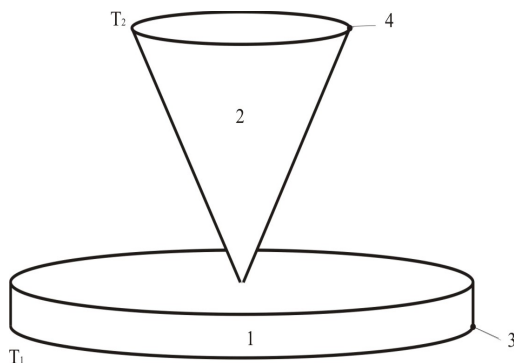


Рис. 1. Фізична модель вимірювання коефіцієнта термоЕРС.

Перепад напруги, що виникає у зразку внаслідок наявності перепаду температур між верхньою та нижньою гранями зразка, вимірюється між двома точками 3 (потенціал $U = 0$) та 4 (рис 1).

Математична та комп'ютерна модель

Моделювання теплових потоків у зонді зроблено в програмі Femlab. Для цього попередньо було побудовано математичну модель, на основі якої описано розподіли температури, потенціалу та струмів у зонді та зразку.

Рівняння розподілу фізичних полів у термоелементі отримані із законів збереження енергії

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

та електричного заряду

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

де

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

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

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

\vec{W} – густина потоку енергії, \vec{j} – густина електричного струму, U – електричний потенціал, T – температура, α , σ , κ – коефіцієнти термоЕРС, питомих електропровідності та теплопровідності. Оскільки перепад температури у зразку не значний (10 K), то температурна

залежність кінетичних коефіцієнтів не враховувалася.

Врахувавши в (4) вирази (5), (6), отримали:

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

Тоді закони збереження (2), (3) набувають вигляду

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

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

Рівняння (8) і (9) – це диференціальні рівняння другого порядку у частинних похідних для шуканих функцій U і T .

Наступним кроком моделювання було зведення диференційних рівнянь (7) та (8) до однієї з стандартних форм (10) програми Femlab.

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

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

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

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

де

(13) – коефіцієнти для комп'ютерної програми Femlab.

Результати комп'ютерного моделювання

Комп'ютерне моделювання здійснювалося за допомогою програми Femlab. Отримано розподіли температурного (рис. 2) та потенціального полів (рис. 3), що створюються в досліджуваному зразку та термозонді.

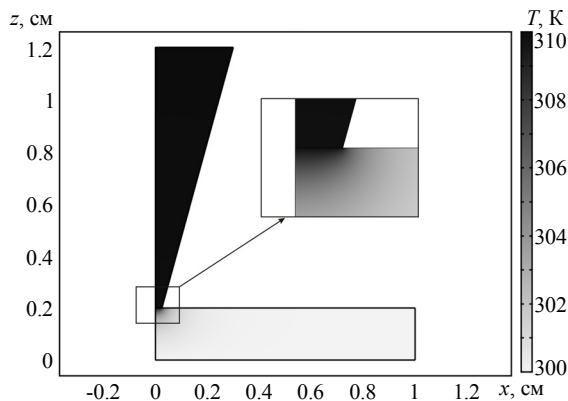


Рис. 2. Розподіл температури в зонді та зразку.

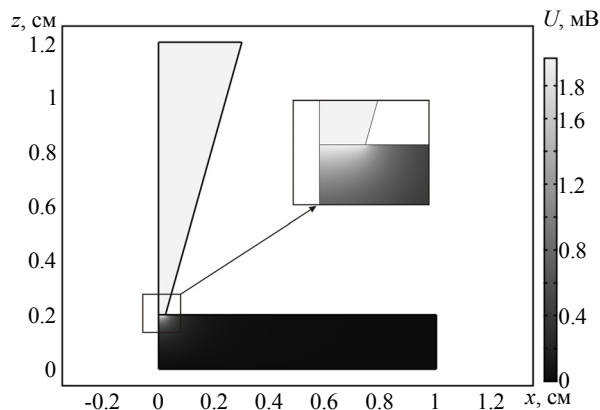


Рис. 3. Розподіл потенціалу в зонді та зразку.

Вплив теплопровідності зразка

Наступним кроком моделювання було дослідження впливу теплопровідності зразка на точність вимірювання коефіцієнта термоЕРС α . Розглянуто широкий діапазон теплопровідності від $0.001 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\text{К}^{-1}$ до $4 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\text{К}^{-1}$ для різних діаметрів зонда. Розподіли температурного поля в зонді наведено на рис. 4 – 6, вплив теплопровідності – у таблиці 1.

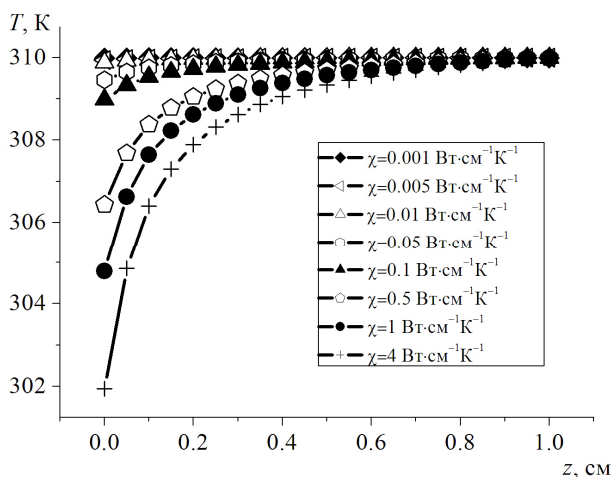


Рис. 4. Розподіл температури вздовж вісі зонда за різних значень теплопровідності зразка. Діаметр вістря зонда 0.5 мм .

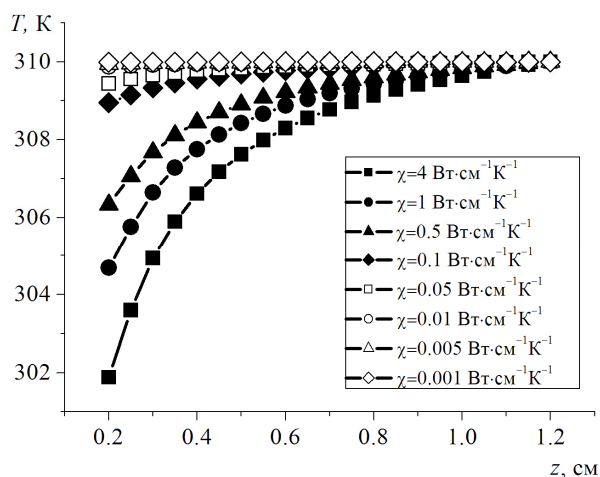


Рис. 5. Розподіл температури вздовж вісі зонда за різних значень теплопровідності зразка. Діаметр вістря зонда 1 мм .

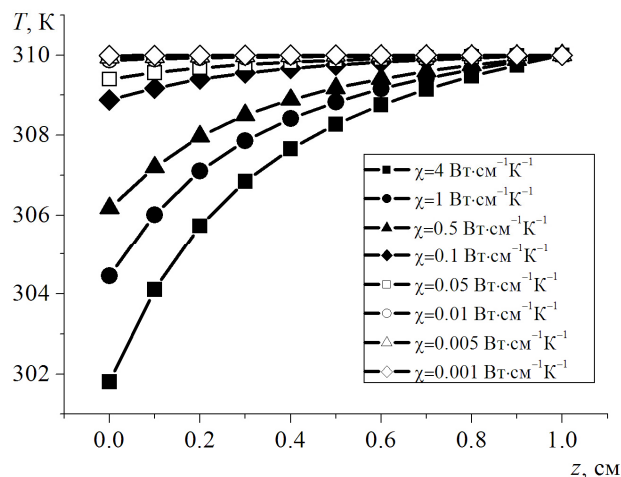


Рис. 6. Розподіл температури вздовж вісі зонда за різних значень теплопровідності зразка. Діаметр вістря зонда 1.5 мм .

Аналіз отриманих результатів показує, що під час вимірюванні α зондовим методом зразків з великою теплопровідністю відбувається значне розсіювання тепла. В результаті цього похибки під час вимірювання коефіцієнта термоЕРС можуть досягти 80% . Цю обставину слід враховувати під час вимірюванні α у зразках з великою теплопровідністю.

Додаткові дослідження впливу діаметра кінця вістря на величину похибки показали, що зміна діаметра в межах $0.1 - 1 \text{ мм}$ не призводить до зменшення похибки вимірювання коефіцієнта термоЕРС термозондом.

Таблиця 1

Залежність різниці потенціалів та температури на границі "зонд – зразок" від теплопровідності досліджуваного зразка ($\alpha = 200$ мкВ/К, діаметр зонда 0.5 мм)

№п/п	χ , Вт·см ⁻¹ ·К ⁻¹	Температура на границі "зонд-зразок", К	E , мкВ	Похибка, %
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

Вплив вихрових струмів

У результаті моделювання встановлено, що в зоні контакту "зонд – зразок" виникають вихрові термоелектричні струми (рис. 7).

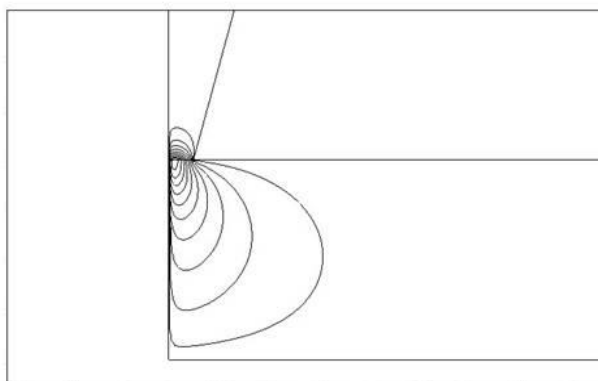


Рис. 7. Вихрові термоелектричні струми, які виникають на контакті зонд – зразок.

З огляду на це досліджено вплив таких струмів на точність вимірювання α . Для цього зроблено порівняння термоЕРС, яка виникла в зразку з урахуванням вихрових струмів і термоЕРС, розраховану за формулою (1) за відомої температури кінця вістря зонда. Дослідження проводилися для різних параметрів матеріалу. Отримані результати наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Вплив вихрових струмів на точність вимірювання α
 методом гарячого зонда

№	α , мкВ/К	σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	χ , Вт·см ⁻¹ ·К ⁻¹	$E_{\text{те}}$, мкВ	E , мкВ	ΔE , мкВ.	Похибка, %
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

Як видно з таблиці, похибка зумовлена впливом вихрових струмів зростає під час вимірюванні α зразків із великою електропровідністю.

Вплив матеріалу зонда та кута при основі на розподіл температурного поля

Здійснено розрахунок впливу матеріалу зонда та кута при його основі на розсіювання тепла під час вимірювання коефіцієнта термоЕРС методом гарячого зонда. Дослідження проводилися для двох матеріалів зонда – міді та вольфраму. Результати вимірювання подано на рис. 8 та рис. 9.

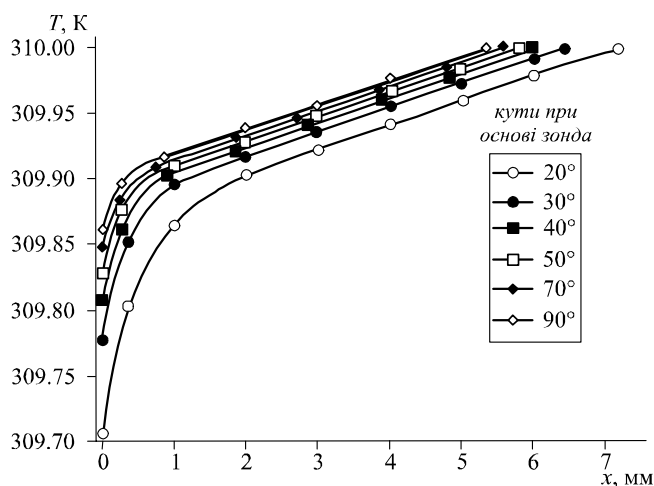


Рис. 8. Розподіл температури вздовж мідного зонда з діаметром кінця вістря 0.2 мм для різних кутів при основі зонда.

На вище приведених графіках подано розподіл температури в зонді залежно від кута при його основі для вольфраму та міді при діаметрі кінця вістря 0.2 мм. Показано, що вольфрамовий зонд має втричі більші втрати порівняно з мідним. Отож як матеріал зонда доцільніше використовувати мідь.

Встановлено, що при куті 40° і більше криві мало відрізняються, що дає можливість визначити оптимальний кут при вершині зонду.

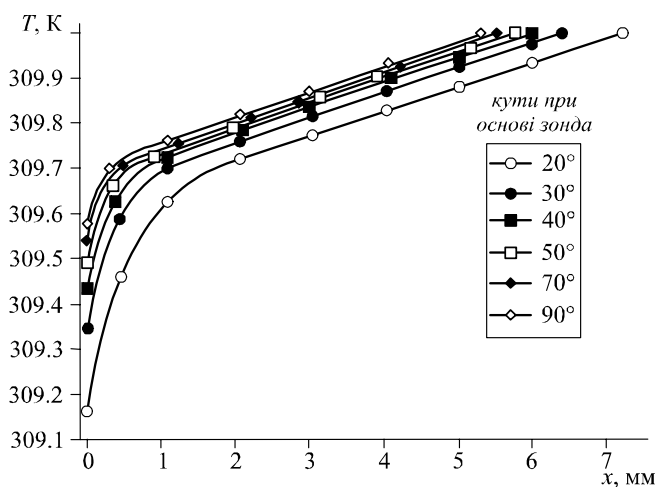


Рис. 9. Розподіл температури вздовж вольфрамового зонда з діаметром кінця вістря 0.2 мм для різних кутів при основі зонда.

Висновки

1. Створено комп'ютерну модель вимірювання коефіцієнта термоЕРС, що дало можливість знайти розподіли температури, потенціалу і струмів у зонді та зразку термоелектричного матеріалу.
2. Встановлено, що зміна діаметра зонда вимірювальної установки в межах 0.1 – 1 мм не впливає на точність визначення α .
3. Показано, що під час вимірювання α зразків з великою теплопровідністю спостерігається значне спотворення температурного поля в зонді, у результаті чого похибки під час вимірювання коефіцієнта термоЕРС можуть досягати 80%.
4. Встановлено, що під час вимірювання α зразків з великою електропровідністю похибка зумовлена впливом вихрових струмів, зростає до 2%.
5. Досліджено вплив матеріалу зонда на розподіл температурного поля у зразку. Встановлено, що зонд має бути виготовлений з матеріалу з високою теплопровідністю (наприклад, мідь).

Автор висловлює щирю подяку О.Я. Лусте та Р.В. Кузю за консультації та допомогу при створенні комп'ютерної моделі.

Література

1. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: [справочник] / Анатичук 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. Анатичук, В.Т. Димитрашук, О.Я. Лусте [и др.] // Издательство 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. Обладнання для визначення параметрів злитків термоелектричних матеріалів / В.В. Разиньков // Термоелектрика. – 2002. – №4. – С. 70 – 79.

Надійшла до редакції 01.07.2012.