

Анатичук Л.І.<sup>1,2</sup>, Гаврилюк М.В.<sup>1</sup>, Лисько В.В.<sup>1</sup>, Тюменцев В.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича,  
вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58000, Україна;

<sup>3</sup>Науково – виробниче приватне підприємство «ВЛАНТ», вул. Матросова, 20,  
Чернівці, 58001, Україна

## АВТОМАТИЗОВАНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТРИЖНІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

*У роботі наведено результати розробки обладнання для вимірювання розподілу електропровідності та термоЕРС уздовж стрижнів термоелектричних матеріалів. Зроблено аналіз відхилень реальної фізичної моделі вимірювального обладнання від ідеальної моделі методу вимірювань, а також результати розрахунків похибок вимірювань, викликаних цими відхиленнями. Розроблено метод вимірювання теплопровідності стрижнів. Наведено опис конструкції вимірювального обладнання з автоматизацією процесу вимірювання для підвищення швидкодії і виключення суб'єктивних похибок. Використання такого обладнання при виготовленні термоелектричних модулів дає можливість скоротити витрати термоелектричного матеріалу до ~ 10% за одночасного підвищення якості термоелектричної продукції на ~ 8 – 15%.*

**Ключові слова:** електропровідність, теплопровідність, термоЕРС, похибка, термоелектричний матеріал, автоматизація.

*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, thermalEMF error thermoelectric material, automation.

### Вступ

*Загальна характеристика проблеми.* Важливим при виробництві термоелектричних модулів є покроковий контроль якості термоелектричних матеріалів. Не менш важливим є вибір матеріалу із заданими властивостями, оптимізованими для кожного конкретного завдання. Першим етапом такого контролю є вимірювання властивостей стрижнів термоелектричного матеріалу.

*Аналіз літератури.* Для вимірювання електропровідності стрижнів успішно використовується двозондовий метод [1]. У роботах [2 – 5] наведено детальний аналіз джерел похибок цього

методу й запропоновано шляхи їх мінімізації.

Для визначення коефіцієнта термоЕРС стрижнів зазвичай використовується метод гарячого зонда [6], що дає можливість знаходити локальне значення термоЕРС у точці, що контактує із зондом.

У роботі [7] наведений опис розробленої в Інституті термоелектрики (Україна) експериментальної установки для визначення електропровідності й термоЕРС стрижнів. Похибки вимірювання цієї установки становлять  $\sim 1\%$  для електропровідності та  $\sim 2\%$  для коефіцієнта термоЕРС. Недоліком такого обладнання є ручний режим здійснення вимірювань і обробки їх результатів.

*Мета роботи* – розробка обладнання для вимірювання властивостей стрижнів термоелектричних матеріалів шляхом використання автоматизації переміщення вимірювальних зондів, обробки результатів вимірювання та побудови графіків розподілу властивостей матеріалу в стрижні.

### Фізична, математична й комп'ютерна моделі методу.

Фізичну модель для розробки методик визначення електропровідності й коефіцієнта термоЕРС стрижнів наведено на рис. 1. Для вимірювання електропровідності використано двозондовий метод, для визначення коефіцієнта термоЕРС – метод гарячого зонду. У фізичній моделі враховано охолодження й нагрівання протилежних країв злитка під дією тепла Пельтьє  $Q_1$ , виділення тепла Джоуля  $Q_2$  у злитку та струмопідводах, а також теплообмін злитка, струмопідводів і вимірювальних зондів з навколишнім середовищем ( $Q_3 - Q_{11}$ ).

Для розрахунків похибок і оптимізації методики вимірювання необхідно знайти розподіли електричного потенціалу  $\varphi$  і температури  $T$  у злитку, які можна одержати із законів збереження електричного заряду й енергії, записаних у вигляді

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

де  $\alpha_j$ ,  $\sigma_j$ ,  $\kappa_j$  – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності елементів фізичної моделі.

Граничні умови для такої фізичної моделі:

– бічні поверхні злитка й струмопідводів електрично ізольовані

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

– через струмопідводи протікає струм величиною  $I$

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

– кінці струмопідводів термостатовані за температури навколишнього середовища  $T_0$

$$T = T_0;$$

– бічні поверхні злитка, вимірювальних зондів і струмопідводів перебувають у стані теплообміну з навколишнім середовищем

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

де  $h_n$  – коефіцієнти тепловіддачі.

Для розрахунків такого завдання використано комп'ютерне об'єктно-орієнтоване моделювання шляхом застосування методу кінцевих елементів, реалізованого в пакеті прикладних програм Comsol Multiphysics.

Основні джерела похибок при вимірюванні електропровідності:

- неоднорідність густини струму в злитку, нерівномірною по всій його поверхні, а тільки в місцях контакту зі струмопідводами, внаслідок підведення струму до торця злитка;
- неізотермічні умови, викликані впливом ефектів Пельтьє та Джоуля, а також теплообміном з навколишнім середовищем.

Було встановлено, що похибки, викликані неоднорідністю густини струму, поблизу торців можуть бути значними – більше 45% у випадку, коли для підведення струму до злитка використовують по одному точковому струмопідводу на кожному з торців (рис. 2).

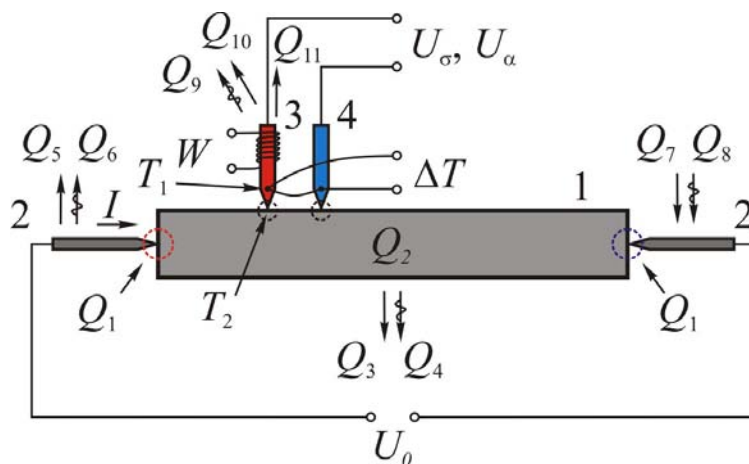


Рис. 1. Фізична модель вимірювання електропровідності й коефіцієнта термоЕРС злитків. 1 - злиток, 2 - струмопідводи, 3, 4 - вимірювальні зонди.

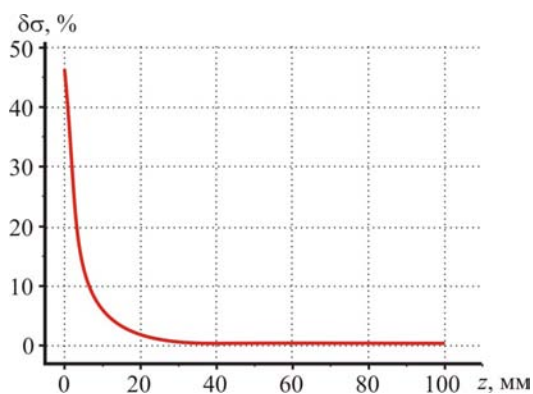


Рис. 2. Залежність похибки вимірювання електропровідності, викликана неоднорідністю густини струму, від відстані  $z$  від зондів до краю злитка.

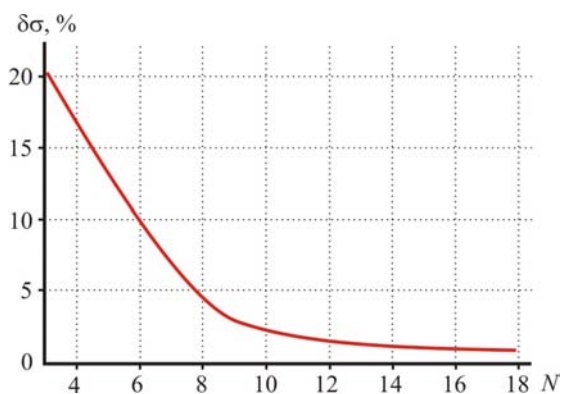


Рис. 3. Залежність похибки вимірювання електропровідності, викликана неоднорідністю густини струму, від кількості струмових контактів  $N$ .

Ситуація поліпшується зі збільшенням числа струмопідводів (рис. 3). Для випадку трьох точок похибка становить близько 20%. Комп'ютерне моделювання дало можливість визначити оптимальну кількість точок контакту – 16, на кожному з торців. Похибка вимірювання, викликана неоднорідністю густини струму при цьому зменшується до 0.9%.

Розроблено також метод усунення впливу ефекту Пельтьє шляхом використання оптимального струму через злиток, за якого охолоджувальна дія ефекту Пельтьє компенсується теплом Джоуля. Похибка при цьому зменшується від 6 до 0.3% (рис. 4).

Загальна похибка вимірювань електропровідності, із врахуванням інструментальних похибок, становить 1.5%. Таким чином, розробленими методами досягнуто підвищення точності вимірювань електропровідності поблизу торців більш ніж в 15 разів.

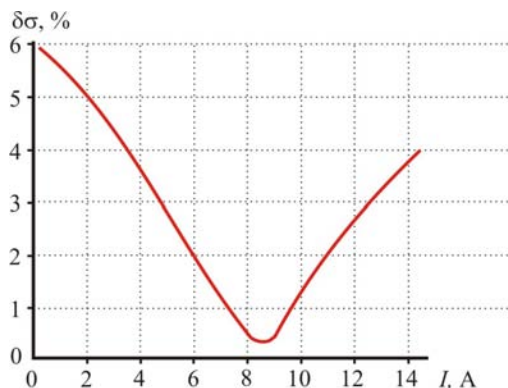


Рис. 4. Залежність похибки вимірювання електропровідності, викликаної впливом ефекту Пельтьє, від струму через злиток.

Похибки при визначенні коефіцієнта термоЕРС виникають через відмінність між температурою  $T_1$  у місці розташування термопари на зонді й температурою  $T_2$  у місці контакту зонда з поверхнею стрижня. Комп'ютерним моделюванням було отримано залежності поправочного коефіцієнта  $K$  від геометрії вимірювального зонда для врахування цієї різниці температур у розрахунках коефіцієнта термоЕРС

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

Використовувався зонд із конічним вістрям. Діаметр основи зонда  $d_1$ , діаметр вістря зонда –  $d_2$ . На рис 5, 6 наведено залежності поправочного коефіцієнта  $K$  від розмірів зонду для випадків мідного (1) і вольфрамового (2) вістря.

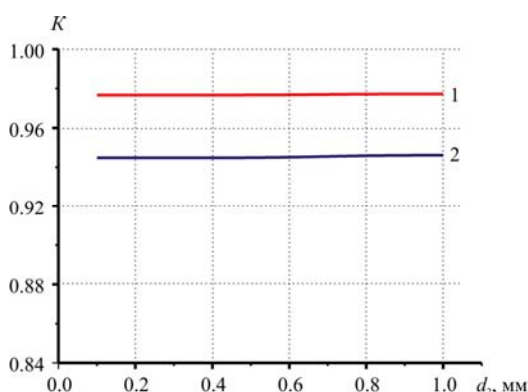


Рис. 5. Залежність поправочного коефіцієнта для розрахунків коефіцієнта термоЕРС злитка від діаметра вістря зонда.

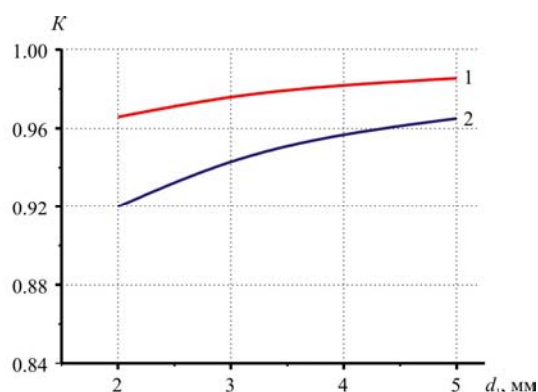


Рис. 6. Залежність поправочного коефіцієнта для розрахунків коефіцієнта термоЕРС злитка від діаметра основи зонда.

Розроблено також методику вимірювання теплопровідності злитків. Для цього було вивчено комп'ютерну модель, яка дає можливість знаходити розподіл температури у злитку в довільний момент часу. Розглядався злиток термоелектричного матеріалу, на одній з торцевих граней якого розташований електричний нагрівач. Рівняння для знаходження розподілу температури має вигляд

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-\kappa \nabla T) = 0, \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина,  $C$  – теплоємність,  $\kappa$  – теплопровідність матеріалу злитка.

Розв'язання рівняння (2) із граничними умовами, що враховують теплообмін злитка з навколишнім середовищем, дало можливість одержати градувальні криві для визначення коефіцієнта теплопровідності матеріалу із часу досягання заданого перепаду температур між двома точками на поверхні злитка (рис. 7).

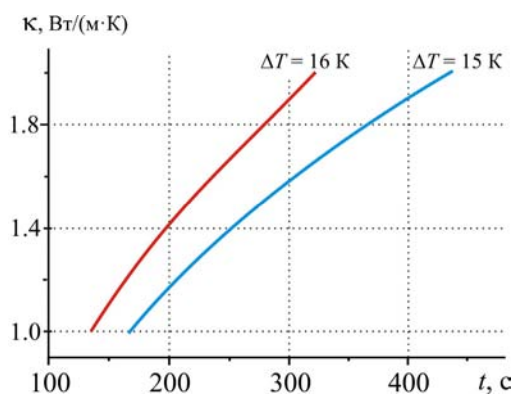


Рис. 7. Градувальні залежності для визначення теплопровідності злитка.

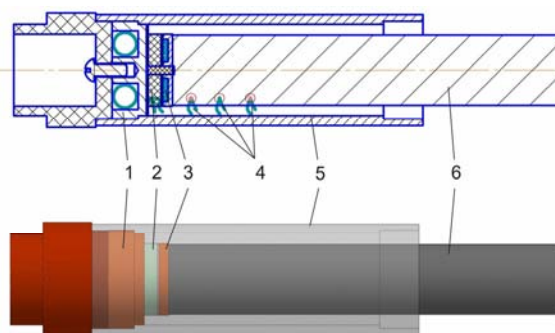


Рис. 8. Конструкція обладнання для визначення теплопровідності злитків.

Обладнання для визначення теплопровідності і його зовнішній вигляд наведено на рис. 8. Воно складається з еталоного нагрівача 3, термопар-зондів 4, екранного нагрівача 1, диференціальної «нуль-термопари» 2 і екранної трубки 5. Теплопровідність визначається за швидкістю досягання заданого перепаду температури між термопарами.

Базуючись на описаних методах було розроблено обладнання для дослідження властивостей злитків, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 9.



Рис. 9. Зовнішній вигляд тримача злитка.

Устаткування повністю автоматизоване, включаючи переміщення зондів і поворот злитка навколо своєї осі, а також процес вимірювання і обробки результатів.

Разом з державним підприємством «Чернівецький регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології й сертифікації» (ДП «Буковинастандартметрологія») було розроблено методики метрологічної атестації цього обладнання та здійснено випробування, що дали можливість підтвердити його високу точність і відтворюваність результатів: похибка не більше 0.5% під час вимірювання електропровідності та не більше 1% під час вимірювання термоЕРС; похибка у визначенні теплопровідності не більша 10%.

Розроблене обладнання для визначення властивостей стрижнів може бути корисним при виробництві термоелектричних модулів. Його використання дає можливість досягти економії матеріалу близько 10%, а також підвищує якість модулів на 8 – 15%.

## Висновки

1. Методами комп'ютерного моделювання визначено вплив різних похибок на точність вимірювання електропровідності і термоЕРС стрижнів термоелектричних матеріалів. Знайдено умови для мінімізації впливу цих похибок.

2. Базуючись на результатах комп'ютерного моделювання, розробили автоматизовану установку для вимірювання електропровідності й термоЕРС стрижнів, а також автоматичної обробки результатів вимірювань. Похибки у вимірюванні електропровідності ~ 0.5%, термоЕРС ~1%.
3. Вимірювальна установка обладнана устаткуванням для визначення теплопровідності стрижня в динамічному режимі. Похибка у визначенні теплопровідності ~10%.
4. Застосування описаного вимірювального обладнання у виробничій практиці при виготовленні модулів охолодження дає можливість зменшити витрати термоелектричного матеріалу до 10% і поліпшити якість модулів до 8 – 15%.

## Література

1. Анатичук 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. Лыско В.В. Исследование погрешностей измерения электропроводности стержней термоэлектрического материала // Термоэлектричество. – 2006, №4. С. 49 – 54.
4. Анатичук Л.И., Лыско В.В. Высокоточный метод измерения электропроводности стержней термоэлектрических материалов // Термоэлектричество – 2008, №1. С. 70 – 75.
5. Анатичук Л.И., Лыско 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. – 167 с.
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.

Надійшла до редакції 10. 09. 2015