

УДК 53.08

Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}
Разіньков В.В., канд. фіз.-мат. наук¹
Гаврилюк М.В.^{1,2}

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
e-mail: anatysh@gmail.com

²Чернівецький національний університет,
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2,
Чернівці, 58012, Україна.

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ТЕПЛООВОГО ОПОРУ КОНТАКТНИХ СТРУКТУР АБСОЛЮТНИМ МЕТОДОМ

У роботі наведено методичку визначення теплового опору контактних структур для термоелектричних перетворювачів енергії, що базується на абсолютному методі вимірювання теплопровідності. Описано модифіковану конструкцію обладнання «АЛТЕК-10001», розробленого в Інституті термоелектрики (Україна), для реалізації такої методички. Наведено приклад результатів досліджень теплового опору контактної структури, що складається з термоелектричного матеріалу з антидифузійним нікелевим покриттям, мідної та керамічної пластин. Бібл. 19, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: тепловий контактний опір, теплопровідність, вимірювання, термоелектричні перетворювачі енергії, абсолютний метод.

Вступ

Однією з основних перешкод для мініатюризації термоелектричних перетворювачів енергії, а отже, значного зниження їх вартості та розширення можливостей практичних використань є відносно великі значення контактних опорів. Це пов'язано з тим, що вплив контактного опору на ефективність термоелектричного перетворювача енергії зростає в міру його мініатюризації [1–5]. Тому розробка методів та обладнання для дослідження контактних структур у термоелектричних перетворювачах енергії, створення технології їх виготовлення та її оптимізації є важливою та актуальною задачею.

При цьому, як показує аналіз літератури [6, 7], точність та надійність методів вимірювання контактного теплового опору, як і методів вимірювання електричного контактного опору, вимагає істотного покращення для реалізації на практиці можливостей зниження контактних опорів, передбачених теоретичними дослідженнями.

Основи методів вимірювання теплового контактного опору, які ґрунтуються на вимірюванні стаціонарного теплового потоку, що проходить через зразок в певному напрямку, викладені в міжнародному стандарті ASTM D5470-06 [8]. Так, у роботі [9] описується стандартний метод, який ґрунтується на використанні в якості вимірювача теплового потоку еталонного зразка із заздалегідь відомою теплопровідністю.

Для визначення теплового контактного опору може бути використаний дещо модифікований комплексний абсолютний метод визначення термоелектричних властивостей матеріалів та відповідне автоматизоване вимірювальне обладнання «АЛТЕК-10001», розроблене в Інституті термоелектрики (Україна) [10–16]. Для використання такого методу не потрібні еталонні зразки, оскільки тепловий потік через досліджувану структуру визначається електричною потужністю джерела тепла, а всі можливі теплові втрати мінімізуються.

Мета цієї роботи – на основі аналізу особливостей фізичних процесів, що мають місце при вимірюванні теплового опору контактних структур для термоелектричних перетворювачів енергії комплексним абсолютним методом, розробити модифіковану конструкцію обладнання «АЛТЕК-10001» для реалізації таких вимірювань.

1. Опис методики вимірювання теплового опору контактних структур для термоелектричних перетворювачів енергії та конструкції вимірювального обладнання

Детальна фізична модель комплексного абсолютного методу, взятого за основу при розробці методики визначення теплового контактної опору та дослідження точності такої методики, наведена на рис. 1. Вона містить зразок термоелектричного матеріалу 1 з нанесеними на його торцеві поверхні металевими антидифузійними покриттями 2, металеві пластини 3, керамічні контактні пластини 4, перехідні контактні шари 5, термостат 6, еталонне джерело тепла – електричний нагрівник 7, а також термометри $T_1 - T_4$ для вимірювання температур нагрівника, термостату та градієнту температур у зразку.

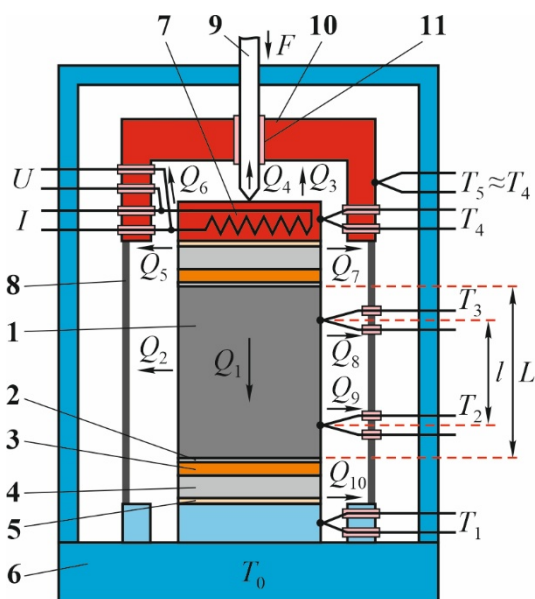


Рис. 1. Фізична модель процесу вимірювання теплопровідності термоелектричних матеріалів та теплового опору контактних структур абсолютним методом:

1 – зразок термоелектричного матеріалу; 2 – металеві антидифузійні покриття;

3 – металеві контактні пластини; 4 – керамічні контактні пластини;

5 – перехідні контактні шари; 6 – термостат; 7 – електричний нагрівник;

8 – екран; 9 – притискний механізм; 10 – нагрівник екрану; 11 – теплові ключі

На рис. 1: Q_1 – тепло, яке перетікає від зразка до термостату; Q_2 – втрати тепла шляхом випромінювання з поверхні зразка; Q_3 – втрати тепла шляхом випромінювання з поверхні

нагрівника; Q_4 – втрати тепла через притискний механізм; Q_5 – втрати тепла шляхом випромінювання з поверхні контактних структур; Q_6 – втрати тепла через струмові та потенціальні провідники нагрівника; $Q_7 - Q_{10}$ – втрати тепла через провідники термопар; T_0 – температура термостата. Зображена на рисунку контактна структура є аналогічною тій, що зазвичай використовується у термоелектричних перетворювачах енергії (металеві антидифузійні покриття, металеві комутаційні пластини та керамічна основа).

Величина теплопровідності κ зразка термоелектричного матеріалу визначається за формулою

$$\kappa = \frac{W}{T_3 - T_2} \frac{l}{S}, \quad (1)$$

де: $W = I \cdot U$ – тепловий потік через зразок, що приймається рівним електричній потужності нагрівника; T_2 і T_3 – температури на бічній поверхні зразка у точках, що знаходяться на відстані l одна від одної; S – площа поперечного перерізу зразка.

Для визначення теплового опору R_T досліджуваної контактної структури додатково вимірюються температура нагрівника T_4 , температура термостату T_1 та загальна довжина зразка L . Припустивши, що тепловий опір контактних структур на обох торцях зразка є однаковим, його величину можна визначити за формулою

$$R_T = \frac{1}{2} \left[(T_4 - T_1) - \frac{L}{l} (T_3 - T_2) \right] \frac{S}{W}. \quad (2)$$

Як показало комп'ютерне об'єктно-орієнтоване моделювання, проведене за допомогою платформи Comsol Multiphysics [17, 18], основним джерелом похибок визначення як теплопровідності матеріалу зразка, так і теплового опору контактних структур, є втрати тепла шляхом випромінювання з поверхні еталонного нагрівника та зразка. Визначено, що при температурі $T_0 = -50$ °С похибки визначення теплового потоку через досліджувану структуру не перевищують 3.5 % і зростають при підвищенні температури до 28 % при $T_0 = 300$ °С. При цьому, вибором оптимальних значень випромінювальної здатності елементів фізичної моделі вони можуть бути зменшені до рівня 0.7–3.4 %.

Крім того, всі провідники термопар та еталонного нагрівника виводяться назовні через так звані теплові ключі, які являють собою вузли з електроізоляторів з якомога більшою теплопровідністю, наприклад, з окису берилію. Вони виконані у вигляді трубок, кілець або пластинок. Через отвори в них пропускаються провідники, які приводяться у тепловий контакт з електроізолятором. Останній, в свою чергу, знаходиться у тепловому контакті з градієнтним радіаційним екраном. В цьому випадку різниця температур вздовж провідників наближується до нуля, тепловий потік через них мінімізується і, отже, мінімізується величина похибок. Аналогічний тепловий ключ використовується і у притискному механізмі для фіксації зразка. Сумарно втрати тепла через провідники термопар, струмові і потенціальні провідники нагрівника, а також через притискний механізм, при застосуванні таких теплових ключів не перевищуватимуть 0.5 %.

Ці результати лягли в основу модифікованої конструкції вимірювального блоку обладнання «АЛТЕК-10001», розробленого в Інституті термоелектрики (Україна), для реалізації запропонованої методики визначення теплового опору контактних структур спільно з вимірюваннями теплопровідності термоелектричного матеріалу, зображеного на рис. 2.

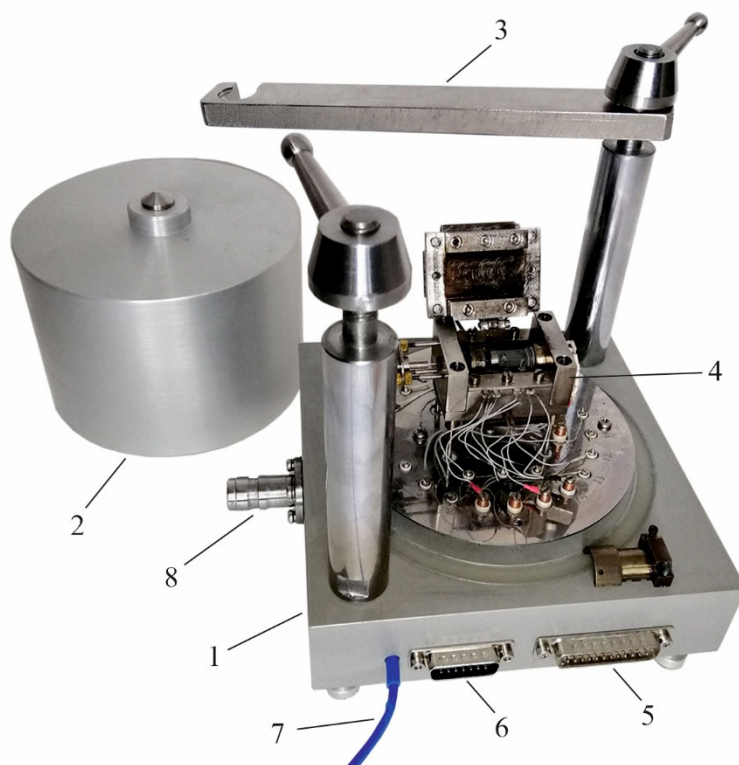


Рис. 2. Вимірювальний блок обладнання «АЛТЕК-10001», розроблено в Інституті термоелектрики (Україна): 1 – металева основа; 2 – вакуумний ковпак; 3 – притиск ковпака; 4 – вимірювальна комірка - термостат; 5, 6 – роз’єми для підключення до блоку керування вимірюваннями; 7 – нульові кінці термопар; 8 – штуцер для підключення до вакуумного насосу

Схему вимірювальної комірки - термостату, в якій розміщується зразок – досліджувана контактна структура, наведено на рис. 3. Перепад температури у зразку створюється за допомогою еталонного нагрівника 3, який притискається до зразка тонкостінною трубкою 6.

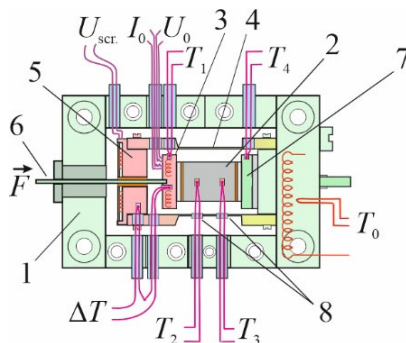


Рис. 3. Схема вимірювальної комірки: 1 – корпус термостату; 2 – досліджувана контактна структура; 3 – еталонний нагрівник; 4 – екран; 5 – нагрівник екрану; 6 – притиск; 7 – посадочна площадка; 8 – теплові ключі

Для зменшення теплових втрат з поверхні зразка та еталонного нагрівника використовується градієнтний радіаційний екран 4 з нагрівником екрану 5, а також теплові ключі 8 на всіх електродах зразка та еталонного нагрівника.

У товщі стінок термостату вмонтовано нагрівні елементи та спай термопар (T_0), що використовується для стабілізації температури вимірювального блоку терморегулятором.

У бічну поверхню зразка на певній віддалі один від одного вмонтовано вимірювальні зонди. Їх виготовлено з матеріалу, який має значну теплопровідність і є хімічно інертним відносно матеріалу зразка, наприклад, з платини. У зондах встановлено робочі спаї вимірювальних диференціальних термопар (T_2 та T_3). Вони перебувають у надійному тепловому та електричному контакті з корпусами зондів.

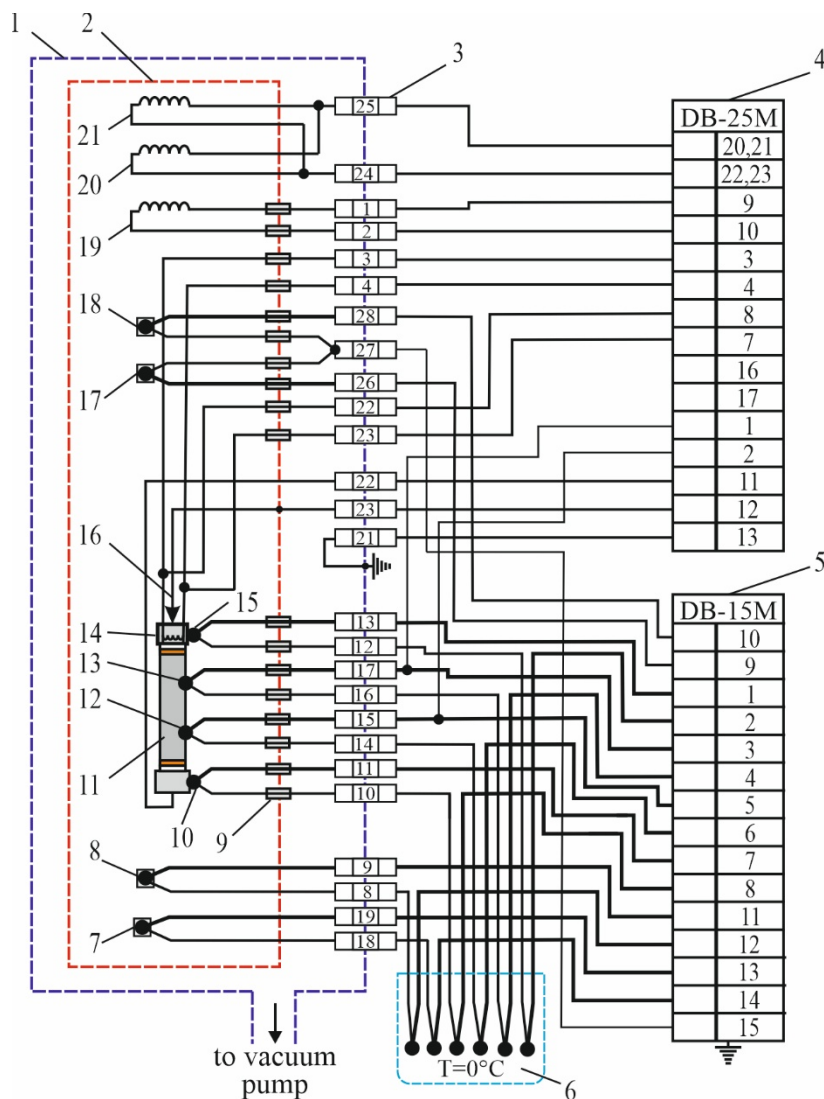


Рис. 4. Електрична схема вимірювального блоку: 1 – вимірювальний блок; 2 – термостат; 3 – гермовиводи; 4 – роз’єм типу DB-25M; 5 – роз’єм типу DB-15M; 6 – посудина Дьюара; 7 – термопара для терморегулятора термостату; 8 – термопара для системи захисту від перегріву; 9 – теплові ключі; 10, 12, 13, 15 – термопари; 11 – зразок; 14 – еталонний нагрівник; 16 – притиск; 17, 18 – термопари для визначення перепаду температур між нагрівниками зразка та екрану; 19 – нагрівник екрану; 20, 21 – нагрівники термостату

Робочі спаї двох додаткових термопар, що необхідні для визначення теплового опору контактної структури, розміщено у еталонному нагрівнику (T_1) та у посадочній площадці (T_4). Вільні кінці всіх термопар знаходяться у посудині Дьюара (за температури 0°C).

Електрична схема вимірювального блоку наведена на рис. 4. Електричні виводи вимірювального блоку 1 за допомогою двох роз’ємів 4 і 5 та відповідних кабелів, підключаються до системи керування вимірюваннями.

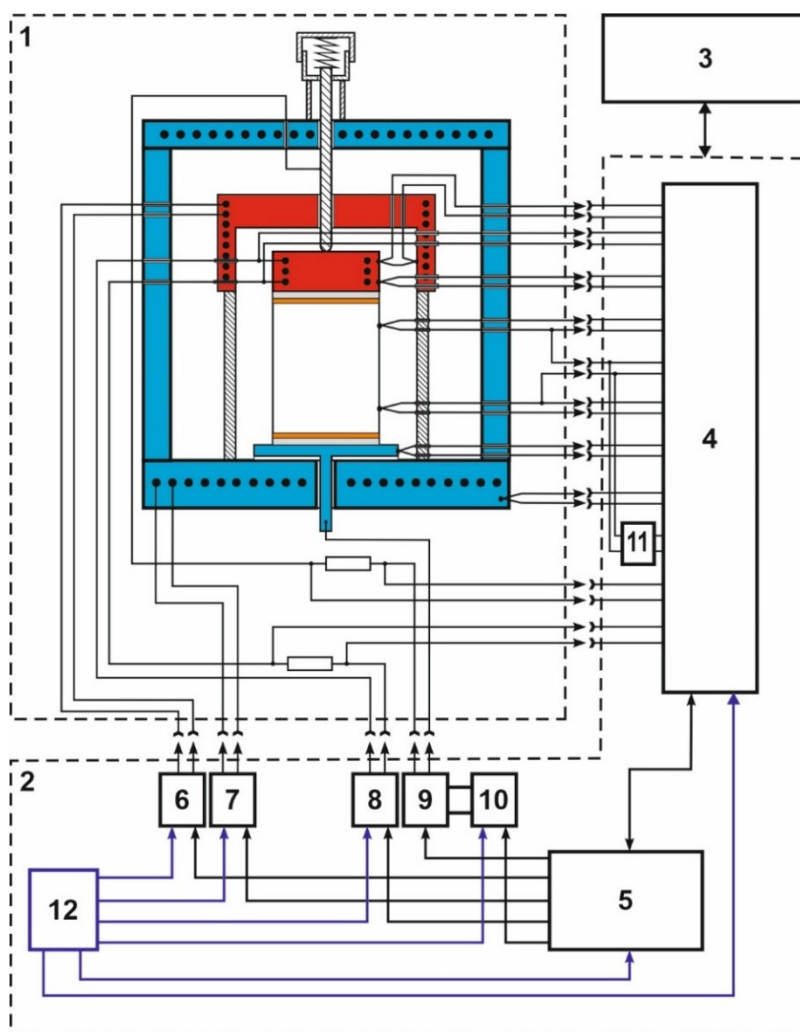


Рис. 5. Блок-схема системи керування вимірюваннями: 1 – вимірювальний блок; 2 – блок керування вимірюваннями; 3 – комп'ютер; 4 – аналого-цифровий перетворювач; 5 – контролер; 6, 7 – ключі; 8, 10 – джерела регульованої напруги; 9 – електронний комутатор; 11 – синхронний детектор; 12 – блок живлення

Система керування вимірюваннями складається з блоку керування та комп'ютера з програмним забезпеченням «SThEM», розробленим Інститутом термоелектрики НАН та МОН України спільно з НПП «Терекс» (Україна). Блок-схема системи наведена на рис. 5.

Блок керування вимірюваннями містить:

- засоби задання і підтримки температури вимірювального термостату у широкому інтервалі температур (терморегулятор, блок живлення, контрольна термопара і т. ін.);
- регульований блок живлення для пропускання струму через зразок, комутатор струму;
- регульований блок живлення еталонного нагрівника;
- засоби підтримки нульового перепаду температур між еталонним та екранним нагрівниками (терморегулятор, блок живлення, контрольна нуль-термопара і т. ін.);
- високоточний вимірювач напруги;
- можливість задання необхідної циклограми ввімкнення / вимкнення блоків живлення та моментів запису результатів вимірювання всіх вимірювальних каналів (температур "гарячого" та "холодного" зондів, падіння напруги між зондами, величин струму і напруги через зразок, струму і напруги еталонного нагрівника);

– можливість передачі результатів вимірювань на комп'ютер для їх подальшої обробки, побудови графіків і таблиць, формування паспорту зразка.

У системі використано 24-розрядний 8-канальний аналого-цифровий перетворювач 4 (АЦП) з диференціальними входами, діапазон вимірюваних напруг якого $\pm (5 \text{ мкВ} - 2.5 \text{ В})$. Диференціальні входи АЦП дозволяють виконувати високоточні вимірювання напруг у електричних колах різних блоків з різними джерелами живлення.

До складу системи також входять інтелектуальні ключі 6 та 7 зі своїми схемами захисту від короткого замикання та перевищення заданого струму. Застосування таких ключів забезпечує високу надійність установки, запобігаючи її виходу з ладу у разі неполадок в силових колах. Застосування в якості елементної бази сучасних польових транзисторів, виготовлених за MOSFET технологією, з низьким опором у відкритому стані, зменшує виділення на них тепла, що дозволило обійтись без радіаторів. Ключі здатні при цьому комутувати електричну потужність до 600 Вт.

Для живлення еталонного нагрівника стабільною напругою використано регульоване стабільне джерело напруги 8. Воно може забезпечувати потужність живлення еталонного нагрівника до 10 Вт.

Електронний комутатор 9 дозволяє вмикати або вимикати струм через зразок, змінювати напрям струму, а також живити його знакозмінним струмом. Це дозволяє проводити вимірювання електропровідності термоелектричного матеріалу у випадку, якщо досліджувана контактна структура не містить електроізоляційних шарів. Комутатор складено за схемою Н-мосту на базі потужних польових MOSFET транзисторів. Струм електронного комутатора може змінюватись у межах від 0.01 до 8.0 А. Регульоване джерело стабільного струму 10 забезпечує струм через зразок в межах від 0.05 до 4.0 А. Синхронний детектор 11 дозволяє точно детектувати знакозмінні напруги, а також вимірювати імпульсні значення напруг на зразку. Синхронні детектор складено за ключовою схемою, з різними дискретними входами, керуючи якими можна реалізувати різні режими роботи при пропусканні імпульсного струму через зразок.

Програмований контролер 5 містить два ПІД ШІМ-регулятори температури, дискретні виходи яких запезпечують автоматичну або ручну роботу установки у відповідності із заданими циклограмами та алгоритмами роботи, та вхід для обробки сигналу, що надходить від АЦП.

Блок живлення установки 12 складено на базі силового тороїдального трансформатора та лінійних стабілізаторів напруги без високочастотного шуму, притаманного імпульсним джерелам живлення, що підвищує точність вимірювань.

Вимірювальний блок по каналу USB підключено до персонального комп'ютера 3, де задаються циклограми вимірювань, відбуваються необхідні обчислення, будуються графіки та формуються протоколи вимірювань.

2. Результати експериментальних досліджень

Було проведено серію експериментальних досліджень теплового опору контактних структур та теплопровідності термоелектричних матеріалів, що входять до їх складу. Вигляд досліджуваної структури показано на рис. 6. Вона складалась з термоелектричного матеріалу 1 на основі *Bi-Te* у вигляді прямокутного паралелепіпеда з довжиною 10 мм та перерізом 5×5 мм. На його торці за типовою для процесу виготовлення термоелектричних перетворювачів енергії технологією нанесено антидифузійне нікелеве покриття товщиною 3–5 мкм та припаяно мідні пластини 2 товщиною 0.25 мм та пластини з кераміки 3 товщиною 0.63 мм з оксиду алюмінію.

Для монтажу у бічну поверхню зразка вимірювальних зондів-термопар, у зразку на певній віддалі один від одного зроблено отвори 4. Довжина зразка L та відстані між зондами l визначались за допомогою інструментального мікроскопа з розрізною здатністю 0.001 мм. Для виготовлення зразків використовувалось обладнання, детально описане у роботі [19].

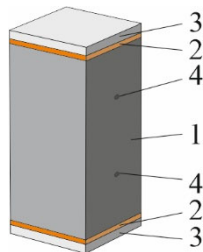


Рис. 6. Досліджувана контактна структура: 1 – термоелектричний матеріал; 2 – мідні пластини; 3 – керамічні пластини; 4 – отвори для зондів-термопар

Досліджуваний зразок контактної структури монтувався у вимірювальну комірку з різними варіантами теплопереходів між торцевими поверхнями зразка та поверхнями еталонного нагрівника і посадочної площадки термостату: «сухий» контакт, керосин, силіконова теплопровідна змазка.

Керування процесом вимірювань здійснювалось за допомогою програмного забезпечення «SThEM» у ручному режимі роботи. За допомогою еталонного нагрівника на зразку створювався перепад температури ~ 10 °С. При цьому терморегулятор забезпечував живлення нагрівника екрану таким чином, щоб температури нагрівників екрану та зразка були рівними. Після встановленні стаціонарних умов фіксувались значення температур T_1 – T_4 та електричної потужності еталонного нагрівника W . Величини теплопровідності та теплового контактного опору обчислювались за формулами (1) та (2) відповідно. Результати вимірювань (при температурі $T_0 = 20$ °С) наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати вимірювань теплопровідності термоелектричних матеріалів та теплового опору контактних структур з різними варіантами теплопереходів

№ з/п	Теплоперехід між торцевими поверхнями досліджуваної структури та поверхнями еталонного нагрівника і термостату	Теплопровідність термоелектричного матеріалу, Вт/(м·К)	Значення питомого теплового опору контактної структури, 10^{-5} К·м ² /Вт
1	«Сухий» контакт	2.07	9.41
2	Керосин	2.04	5.43
3	Силіконова теплопровідна змазка	2.11	8.51

Як видно з таблиці, найкращі показники забезпечує теплоперехід, у якому для покращення теплового контакту між поверхнями використано керосин. Однак, на практиці його застосування є проблематичним. У той же час, використання силіконової теплопровідної змазки відрізняється від «сухого» контакту лише на ~ 10 %. Відхилення у виміряних значеннях теплопровідності термоелектричного матеріалу зразка знаходяться в межах 3.5 %, що відповідає технічним характеристикам обладнання «Алтек-10001» для випадку використання зразків з квадратним перерізом.

Розроблене обладнання буде корисним для подальших досліджень контактних структур іншого складу, їх оптимізації та створення технології виготовлення.

Висновки

1. Розглянуто детальну фізичну модель процесу вимірювань теплопровідності термоелектричних матеріалів та теплового опору контактних структур для термоелектричних перетворювачів енергії. За допомогою комп'ютерного моделювання показано, що похибки вимірювання цих величин в першу чергу визначаються величиною втрат тепла з поверхні еталонного нагрівника та зразка, які у діапазоні температур від -50 до 300 °C можуть бути інструментально зменшені до рівня 0.7 – 3.4 %.
2. Описано модифіковану конструкцію обладнання «АЛТЕК-10001», розробленого в Інституті термоелектрики (Україна), для реалізації запропонованої методики визначення теплового опору контактних структур. Наведено результати досліджень теплового опору контактної структури, що складається з термоелектричного матеріалу з антидифузійним нікелевим покриттям, мідної та керамічної пластин для різних варіантів теплопереходів між поверхнями керамічних пластин та поверхнями еталонного нагрівника і термостату.

Література

1. T. Tritt. (2000). Recent Trends in Thermoelectric Materials Research, Part Two (Semiconductors and Semimetals, Volume 70). *Academic Press*. ISBN-13: 978-0127521794.
2. Rowe D.M. (2006). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420038903>.
3. Vikhor L.M., Anatyshuk L.I., & Gorskyi P.V. (2019). Electrical resistance of metal contact to Bi_2Te_3 based thermoelectric legs. *Journal of Applied Physics*, 126, 164503-1–164503-8.
4. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., & Mitskaniuk N.V. (2019). Contact resistance due to potential barrier at thermoelectric material-metal boundary. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 74–88.
5. Vikhor L., & Kotsur M. (2023). Evaluation of efficiency for miniscale thermoelectric converter under the influence of electrical and thermal resistance of contacts. *Energies*, 16, 4082-1-22. <https://doi.org/10.3390/en16104082>.
6. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., & Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 1). *Journal of Thermoelectricity*, 2, 5–24.
7. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., & Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 2). *Journal of Thermoelectricity*, 3-4, 5–17.
8. ASTM. (2009). Standard test method for thermal conductivity of solids by means of the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique E1225–09.
9. McWaid T., & Marshall E. (1992). Thermal contact resistance across pressed metal contacts in a vacuum environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35(11), 2911–2920.
10. Anatyshuk L.I., Pervozvansky S.V., & Razinkov V.V. (1993). Proceedings of the 12th International Conference on Thermoelectrics (Japan), 553–564.
11. Lysko V.V., & Strusovskyi K.I. (2024). Measuring the thermal resistance of a “metal-thermoelectric material” contact structure using a comprehensive absolute method for determining parameters of thermoelectric materials. *Journal of Thermoelectricity*, 1-2, 46–60.
12. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., & Havryliuk M.V. (2018). Ways for quality improvement in the measurement of thermoelectric material properties by the absolute method. *Journal of*

Thermoelectricity, 2, 90–100.

13. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V., & Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 80–100.
14. Anatyshuk L.I., & Lysko V.V. (2021). Determination of the temperature dependences of thermoelectric parameters of materials used in generator thermoelectric modules with a rise in temperature difference. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 71–78.
15. Anatyshuk L.I., & Lysko V.V. (2021). Method for determining the thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric cooling modules. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 71–82.
16. Anatyshuk L.I., & Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, 1, 65–73.
17. COMSOL Multiphysics. (2021). v. 6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
18. Huebner K.H., Dewhirst D.L., Smith D.E., & Byrom T.G. (2001). *The Finite Element Method for Engineers* (4th ed.). Wiley-Interscience. ISBN: 978-0-471-37078-9.
19. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Zaporov S.F., & Krechun M.M. (2022). Methods and equipment for the preparation of thermoelectric material samples for measuring their properties by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, 3-4, 31–42.

Надійшла до редакції: 29.07.2024.

V.V. Lysko, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*^{1,2}

V.V. Razinkov, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*¹

M.V. Havryliuk^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the National Academy of Sciences
and the Ministry of Education and Science of Ukraine,

1 Nauky Str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,

2 Kotsiubynsky Str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

EQUIPMENT FOR DETERMINING THE THERMAL CONDUCTIVITY OF THERMOELECTRIC MATERIALS AND THE THERMAL RESISTANCE OF CONTACT STRUCTURES USING THE ABSOLUTE METHOD

The paper presents a methodology for determining the thermal resistance of contact structures in thermoelectric energy converters based on the absolute method of thermal conductivity measurement. A modified design of the "ALTEC-10001" equipment, developed at the Institute of Thermoelectricity (Ukraine), is described for implementing this methodology. An example of research results on the thermal resistance of a contact structure consisting of a thermoelectric material with an anti-diffusion nickel coating, a copper plate, and a ceramic plate is provided. Bibl. 19, Fig. 6, Tab. 1.

Key words: thermal contact resistance, thermal conductivity, measurement, thermoelectric energy converters, absolute method.

References

1. T. Tritt. (2000). Recent Trends in Thermoelectric Materials Research, Part Two (Semiconductors and Semimetals, Volume 70). *Academic Press*. ISBN-13: 978-0127521794.
2. Rowe D.M. (2006). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420038903>.
3. Vikhor L.M., Anatyshuk L.I., & Gorskyi P.V. (2019). Electrical resistance of metal contact to Bi_2Te_3 based thermoelectric legs. *Journal of Applied Physics*, 126, 164503-1–164503-8.
4. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., & Mitskaniuk N.V. (2019). Contact resistance due to potential barrier at thermoelectric material-metal boundary. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 74–88.
5. Vikhor L., & Kotsur M. (2023). Evaluation of efficiency for miniscale thermoelectric converter under the influence of electrical and thermal resistance of contacts. *Energies*, 16, 4082-1-22. <https://doi.org/10.3390/en16104082>.
6. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., & Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 1). *Journal of Thermoelectricity*, 2, 5–24.
7. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., & Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 2). *Journal of Thermoelectricity*, 3-4, 5–17.
8. ASTM. (2009). Standard test method for thermal conductivity of solids by means of the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique E1225–09.
9. McWaid T., & Marshall E. (1992). Thermal contact resistance across pressed metal contacts in a vacuum environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35(11), 2911–2920.
10. Anatyshuk L.I., Pervozvansky S.V., & Razinkov V.V. (1993). Proceedings of the 12th International Conference on Thermoelectrics (Japan), 553–564.
11. Lysko V.V., & Strusovskiy K.I. (2024). Measuring the thermal resistance of a “metal-thermoelectric material” contact structure using a comprehensive absolute method for determining parameters of thermoelectric materials. *Journal of Thermoelectricity*, 1-2, 46–60.
12. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., & Havryliuk M.V. (2018). Ways for quality improvement in the measurement of thermoelectric material properties by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 90–100.
13. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V., & Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 80–100.
14. Anatyshuk L.I., & Lysko V.V. (2021). Determination of the temperature dependences of thermoelectric parameters of materials used in generator thermoelectric modules with a rise in temperature difference. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 71–78.
15. Anatyshuk L.I., & Lysko V.V. (2021). Method for determining the thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric cooling modules. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 71–82.
16. Anatyshuk L.I., & Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, 1, 65–73.
17. COMSOL Multiphysics. (2021). v. 6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
18. Huebner K.H., Dewhurst D.L., Smith D.E., & Byrom T.G. (2001). *The Finite Element Method for Engineers* (4th ed.). Wiley-Interscience. ISBN: 978-0-471-37078-9.
19. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Zaparov S.F., & Krechun M.M. (2022). Methods and equipment for the preparation of thermoelectric material samples for measuring their properties by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, 3-4, 31–42.

Submitted: 29.07.2024.