

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}
Лисько В.В., *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}
Струсовський К.І.²

¹ Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

² Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна
e-mail: anatyach@gmail.com

КОМП'ЮТЕРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ЗОНДОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОНТАКТНОГО ОПОРУ «МЕТАЛ – ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МАТЕРІАЛ»

Створено фізичну та комп'ютерну моделі для дослідження можливих похибок вимірювань електричного контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» зондовим методом. Шляхом комп'ютерного моделювання отримано розподіли електричного потенціалу та температури у досліджуваній фізичній моделі для різної геометрії зразків, величини струму через зразок та контактного електричного опору. Встановлено, що відхилення від ізотермічних умов у зразку, викликані впливом ефектів Джоуля та Пельтьє, можуть призводити до дуже значних (понад 100%) похибок при вимірюваннях. Розглянуто можливості мінімізації цих похибок за допомогою термостатування однієї зі сторін зразка. Бібл. 12, рис. 14.

Ключові слова: електричний контактний опір, вимірювання, комп'ютерне моделювання, точність, термоелектричні перетворювачі енергії.

Вступ

Розробка методів та обладнання для дослідження якості контактних структур у термоелектричних перетворювачах енергії та їх подальшої комплексної оптимізації є важливою та актуальною задачею. Вона зумовлена потребою сучасної термоелектрики у мініатюризації термоелектричних перетворювачів енергії, що дозволить значно знизити їх вартість, наблизившись до прийнятної для широких практичних використань. Основною перешкодою для цього є відносно великі значення контактних опорів, оскільки, як відомо, вплив контактного опору на ефективність термоелектричного перетворювача енергії зростає в міру його мініатюризації [1 – 5].

Важливим є забезпечення якісних контактів і для проведення високоточних вимірювань термоелектричних властивостей матеріалів як при матеріалознавчих дослідженнях, спрямованих на пошук шляхів підвищення їх термоелектричної добротності, так і в процесах розробки та виготовлення термоелектричних перетворювачів енергії [6 – 8].

Для створення технології виготовлення контактних структур з прийнятними величинами контактного опору необхідним є проведення комплексу експериментальних досліджень, що є можливими тільки при наявності високоточних методів та обладнання для вимірювання контактних опорів. При цьому, як показує аналіз літератури [9, 10], надійного обладнання для

дослідження контактних опорів «метал – термоелектричний матеріал» на сьогодні ще не створено. Розроблені методи вимірювання електричного контактного опору у термоелектриці можна розділити на такі, що ґрунтуються на вимірюванні характеристик «пачкових» контактних структур, що представляють собою ряд послідовно з'єднаних термоелементів з контактними опорами; зондові та мікроелектронні методи, що потребують виготовлення тестових структур.

Роботи, присвячені вимірюванню контактного опору у термоелектриці, не мають комплексного характеру, спрямованого на розробку високоточної вимірювальної апаратури для широкого використання.

Тому метою цієї роботи був аналіз точності зондового методу вимірювання електричного контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» шляхом детального аналізу його реальної фізичної моделі та комп'ютерної оптимізації для досягнення мінімальних значень похибок. Такий підхід до розробки вимірювальної апаратури був успішно використаний в Інституті термоелектрики (Україна) при створенні обладнання для визначення властивостей термоелектричних параметрів матеріалів комплексним абсолютним методом, що у декілька разів переважає за точністю свої аналоги [11, 12].

1. Опис зондового методу вимірювання електричного контактного опору «метал – термоелектричний матеріал»

Фізична модель зондового методу вимірювання електричного контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» наведена на рис. 1. Досліджувана структура складається зі зразка термоелектричного матеріалу 1 з нанесеним на його торцях металевим (наприклад, нікелевим) покриттям 3, перехідного контактного шару 2, шару припою 4 та металевих (наприклад, мідних) контактних пластин 5. На бічній поверхні зразка розташовано загострений зонд, яким вимірюється розподіл потенціалу вздовж зразка при пропусканні через нього постійного електричного струму величиною I .

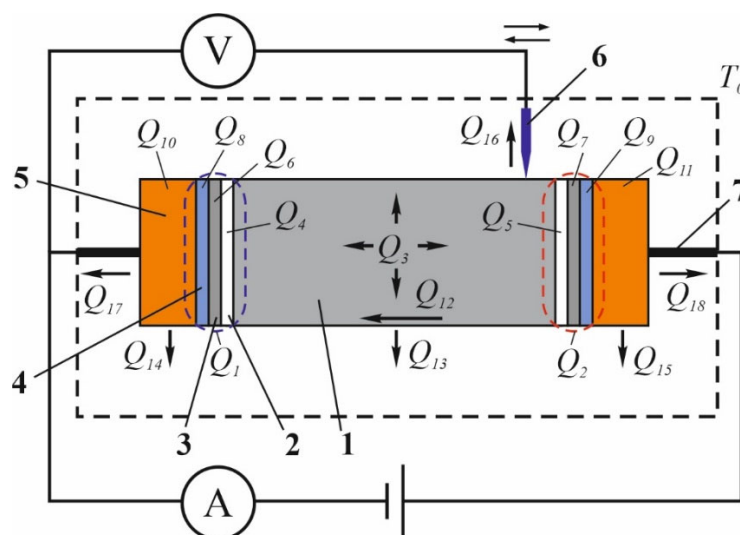


Рис. 1. Фізична модель зондового методу вимірювання електричного контактного опору «метал – термоелектричний матеріал»: 1 – зразок термоелектричного матеріалу; 2 – перехідний контактний шар; 3 – металеве антидифузійне покриття; 4 – припій; 5 – металеві контактні пластини; 6 – рухомий потенціальний зонд; 7 – струмопідводи.

На рис. 1: Q_1 – тепло Пельтьє, що поглинається на контакті «метал – термоелектричний матеріал»; Q_2 – тепло Пельтьє, що виділяється на контакті «термоелектричний матеріал – метал»; Q_3 – тепло Джоуля, що виділяється у об'ємі зразка термоелектричного матеріалу; Q_4, Q_5 – тепло Джоуля, що виділяється на перехідних контактних шарах; Q_6, Q_7 – тепло Джоуля, що виділяється у об'ємі металевих антидифузійних покриттів; Q_8, Q_9 – тепло Джоуля, що виділяється у об'ємі шарів припою; Q_{10}, Q_{11} – тепло Джоуля, що виділяється у об'ємі металевих контактних пластин; Q_{12} – тепловий потік від гарячого до холодного контакту «метал – термоелектричний матеріал»; Q_{13}, Q_{14}, Q_{15} – теплопередача від бічної поверхні зразка та металевих контактних пластин до оточуючого середовища шляхом випромінювання та конвекції; Q_{16}, Q_{17}, Q_{18} – теплопередача від бічної поверхні зразка та металевих контактних пластин до оточуючого середовища шляхом теплопровідності через потенціальний зонд та струмопідводи; T_0 – температура оточуючого середовища.

Значення електричного контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» визначається за формулою

$$r_c = \frac{\Delta U}{I} \cdot S, \quad (1)$$

де r_c – питомий електричний контактний опір «метал – термоелектричний матеріал», ΔU – спад напруги на контакті, S – площа контакту.

Основними джерелами похибок при визначенні контактної опору таким методом будуть наступні:

1. Похибки приладів для вимірювання струму та електричного потенціалу.
2. Похибки при вимірюванні геометричних розмірів зразка та координат місцезнаходження зонда.
3. Відхилення від ізотермічних умов проведення вимірювань, викликані впливом тепла Джоуля, що виділяється при пропусканні електричного струму в об'ємі зразка, струмопідводів та на контактному опорі, а також тепла Пельтьє, що виділяється або поглинається на місцях контакту різновидних матеріалів.

2. Комп'ютерна модель

Для визначення похибок, впливу на них різних факторів і оптимізації методики вимірювання необхідно знайти розподіл електричного потенціалу φ і температури T у зразку, які можна отримати, виходячи із законів збереження електричного заряду і енергії, записаних у вигляді:

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

де: $\alpha_j, \sigma_j, \kappa_j$ – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності і теплопровідності елементів моделі.

Граничні умови для такої моделі:

- бічні поверхні зразка, металевого покриття, контактних пластин і 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 підтримуються при температурі навколишнього середовища T_0

$$T = T_0;$$

- бічні поверхні зразка, металевого покриття, контактних пластин і струмопідводів знаходяться в стані теплообміну з навколишнім середовищем

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

де h_i – коефіцієнти тепловіддачі.

Для розрахунку такої задачі використано комп'ютерне об'єктно-орієнтоване моделювання шляхом застосування методу скінченних елементів (рис. 2), реалізованого в пакеті прикладних програм Comsol Multiphysics.

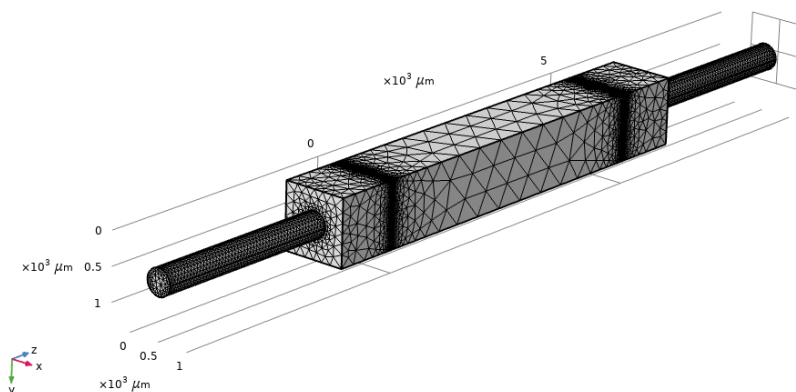
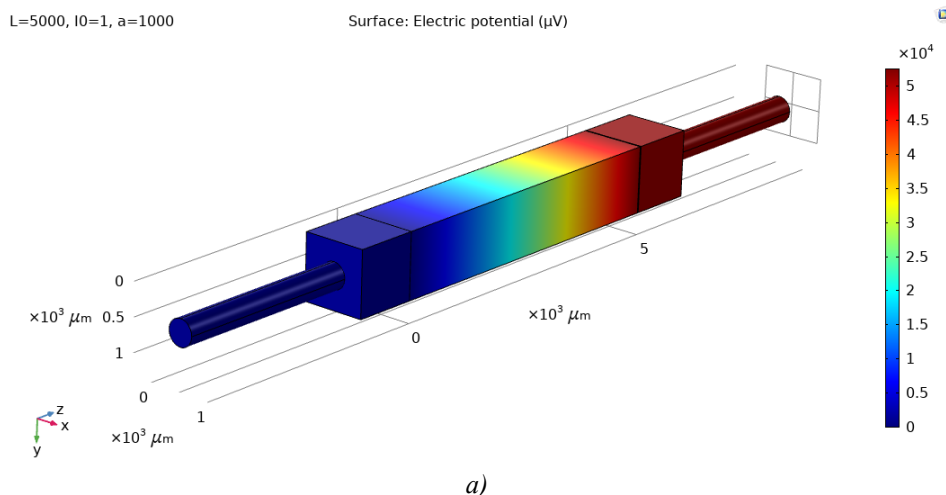
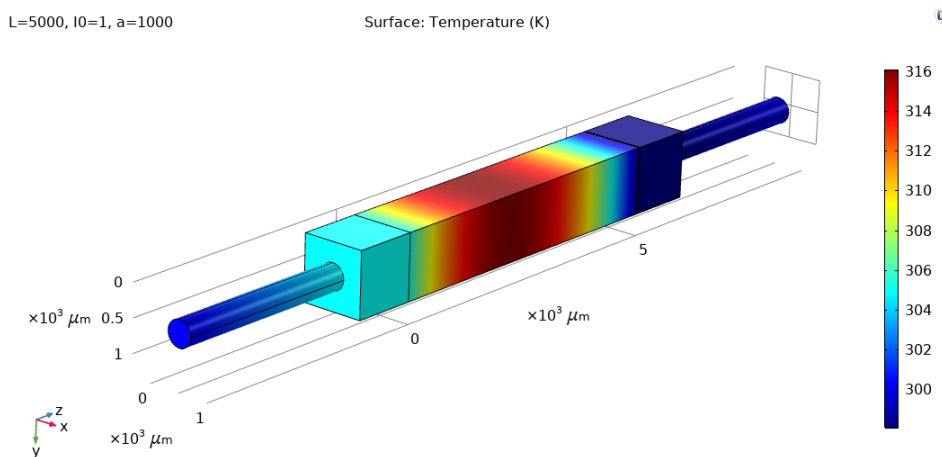


Рис. 2. Сітка методу скінченних елементів при моделюванні зондового методу вимірювання електричного контактного опору в пакеті прикладних програм Comsol Multiphysics.

На рис. 3 наведено типові розподіли електричного потенціалу та температури у досліджуваній контактній структурі, отримані шляхом комп'ютерного моделювання; на рис. 4 – розподіли електричного потенціалу та температури вздовж лінії руху вимірювального зонда (для випадку зразка довжиною 5 мм та перерізом 1 x 1 мм², при струмі через зразок величиною 1 А; контактний опір – 10⁻⁶ Ом·см²).

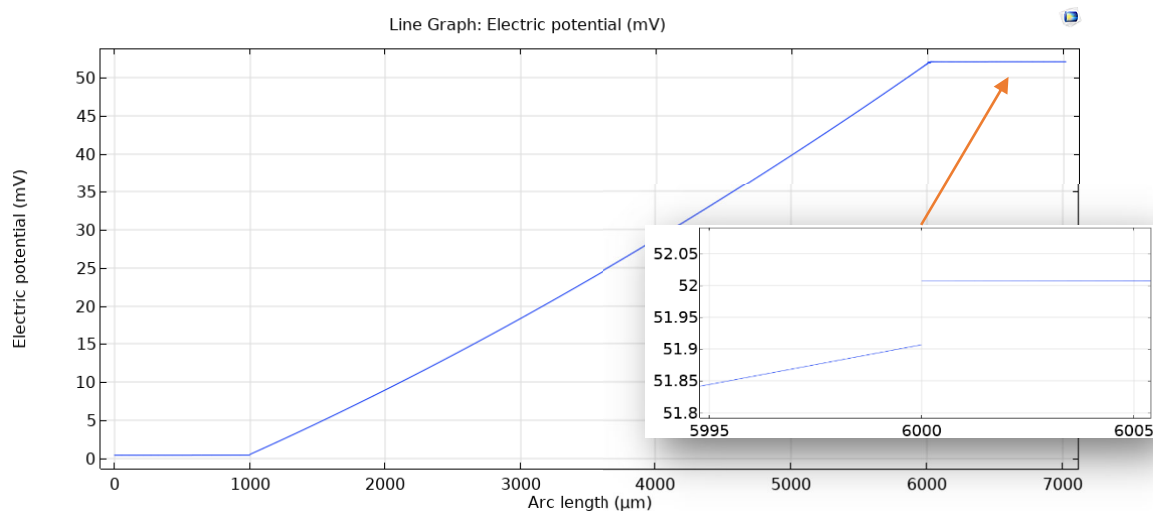


a)

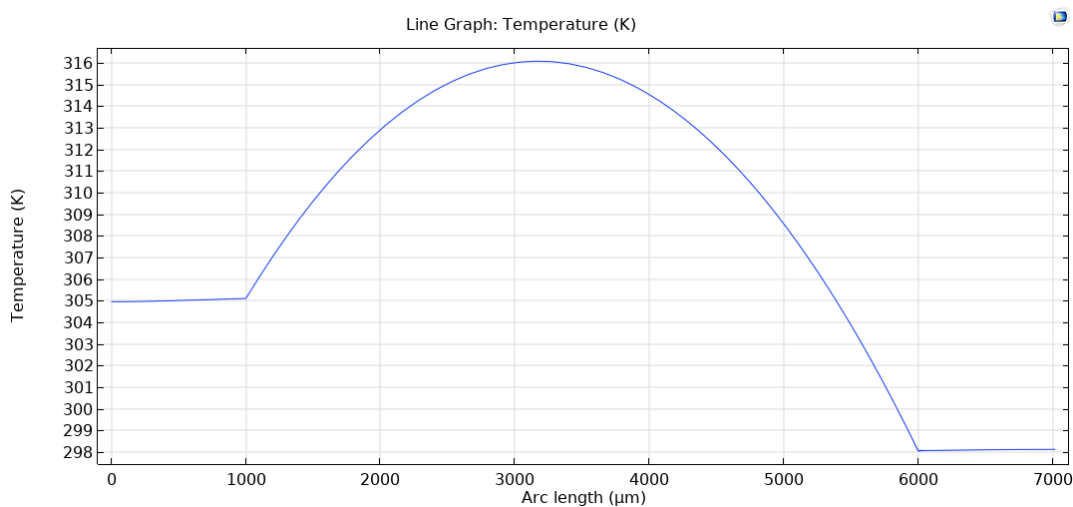


б)

Рис. 3. Типові розподіли електричного потенціалу (а) та температури (б) у досліджуваній контактній структурі, отримані шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою пакету Comsol Multiphysics.



а)



б)

Рис. 4. Розподіли електричного потенціалу (а) та температури (б) на поверхні досліджуваної контактної структури вздовж лінії руху вимірювального зонда (для випадку зразка довжиною 5 мм та перерізом 1 мм², при струмі величиною 1А; контактний опір – 10⁻⁶ Ом·см²).

3. Результати дослідження можливих похибок вимірювання та умови їх мінімізації

Шляхом комп'ютерного моделювання отримано розподіли електричного потенціалу та температури у досліджуваній моделі для різної геометрії зразків, величини струму через зразок та контактного електричного опору.

На рис. 5 наведено приклад залежностей спаду напруги на контакті та на ділянці зразка довжиною 50 мкм від величини струму через зразок для різної геометрії зразка, при величині контактному опору 10^{-6} Ом·см². З цих залежностей видно, що для забезпечення достатньої точності вимірювань електричних струму та напруги сучасними вимірювальними приладами (до 0.05% при розрізній здатності 1 мкВ) потрібно використовувати зразки з перерізом не менше 1 мм² та струм величиною 0.5 – 1 А.

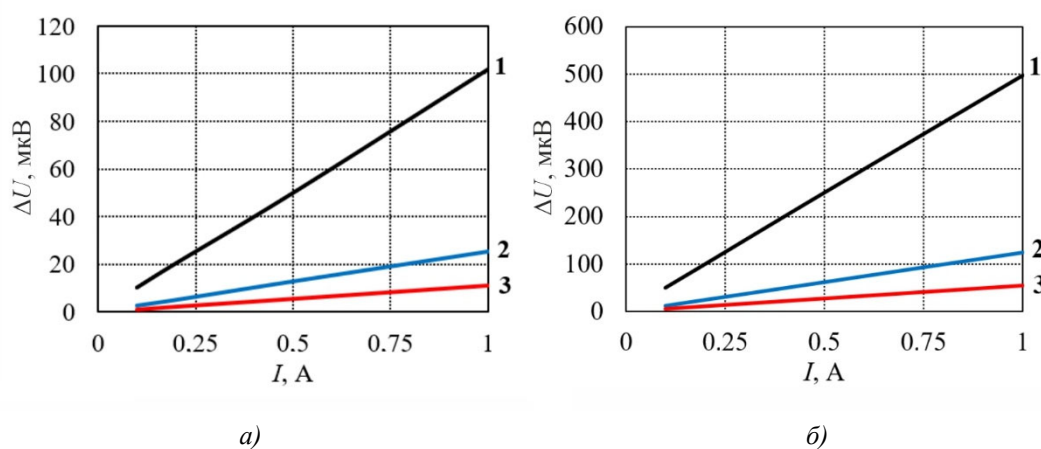


Рис. 5. Залежність спаду напруги на контакті (а) та на ділянці зразка довжиною 50 мкм (б) від величини струму через зразок.

Переріз зразка S : 1 – $1 \times 1 \text{ мм}^2$; 2 – $2 \times 2 \text{ мм}^2$; 3 – $3 \times 3 \text{ мм}^2$.

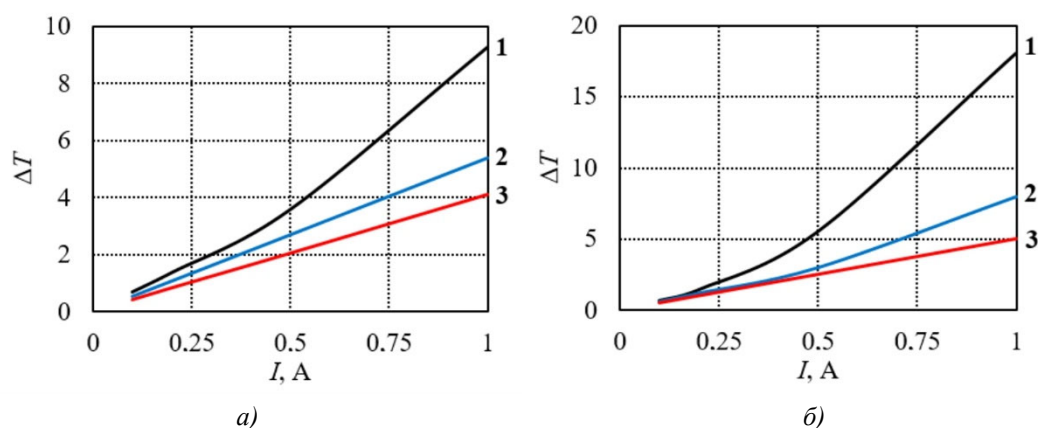


Рис. 6. Залежність перепаду температур на зразку від величини струму через зразок (для зразків довжиною 3 мм (а) та 5 мм (б)): Переріз зразка S : 1 – $1 \times 1 \text{ мм}^2$; 2 – $2 \times 2 \text{ мм}^2$; 3 – $3 \times 3 \text{ мм}^2$.

Однак, при цьому виникає проблема із забезпеченням ізотермічності зразка. На рис. 6 наведено залежності перепаду температур на зразку, який виникатиме при вимірюваннях внаслідок дії ефектів Пельтьє та Джоуля (для випадку теплообміну зразка з оточуючим середовищем шляхом вільної конвекції та випромінювання). Як видно з рисунку, перепад температури на зразку може досягати 18 К, що при зводитиме до дуже значних (понад 100 %) похибок.

похибок при вимірюваннях, викликаних тим, що до вимірюваного омичного спаду напруги додаватиметься і термоЕРС, при чому величини термоЕРС та омичного спаду напруги на зразку будуть співвимірними.

Для мінімізації впливу ефектів Пельтьє та Джоуля зразок однією зі сторін приклеїти до електричного ізолятора з високою теплопровідністю (наприклад, кераміки з окису берилію) та розмістити на термостатованій поверхні (рис. 7).

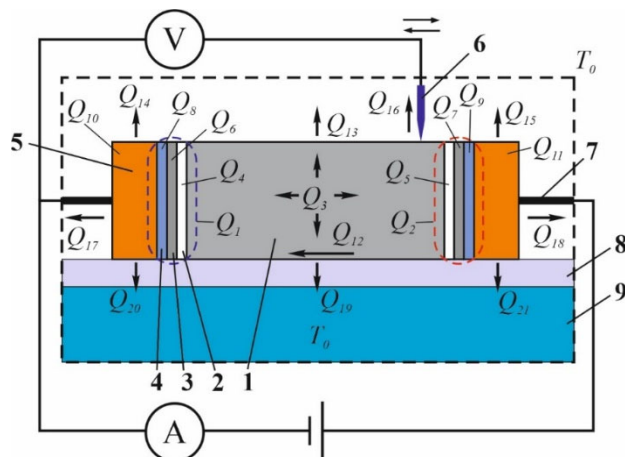


Рис. 7. Термостатування зразка при вимірюванні електричного контактного опору зондовим методом:

- 1 – зразок термоелектричного матеріалу; 2 – перехідний контактний шар;
- 3 – металеве антидифузійне покриття; 4 – припій; 5 – металеві контактні пластини;
- 6 – рухомий потенціальний зонд; 7 – струмопідводи; 8 – електричний ізолятор; 9 – термостат.

Теплові потоки до термостату від цієї сторони зразка, а також від відповідних сторін металевих контактних пластин, позначено Q_{19} , Q_{20} , Q_{21} відповідно. Інші позначення теплових потоків $Q_1 - Q_{18}$ відповідають наведеним раніше для фізичної моделі, показаної на рис. 1.

Як показало комп'ютерне моделювання, при використанні термостатування навіть тільки однієї зі сторін, неізотермічність зразка значно зменшується. Це добре видно з порівняння розподілів температури у досліджуваній контактній структурі (рис. 8) та вздовж лінії руху вимірювального зонда (рис. 9) з аналогічними розподілами без термостатування (рис. 3 б та рис. 4 б).

$L=5000, l_0=1, a=1000$

Surface: Temperature (K)

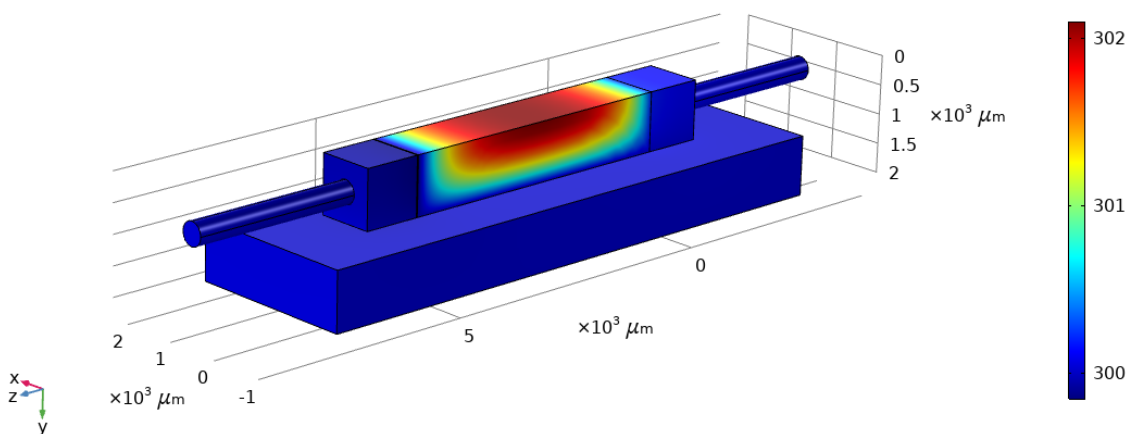


Рис. 8. Розподіл температури у досліджуваній контактній структурі при термостатуванні однієї з її поверхонь.

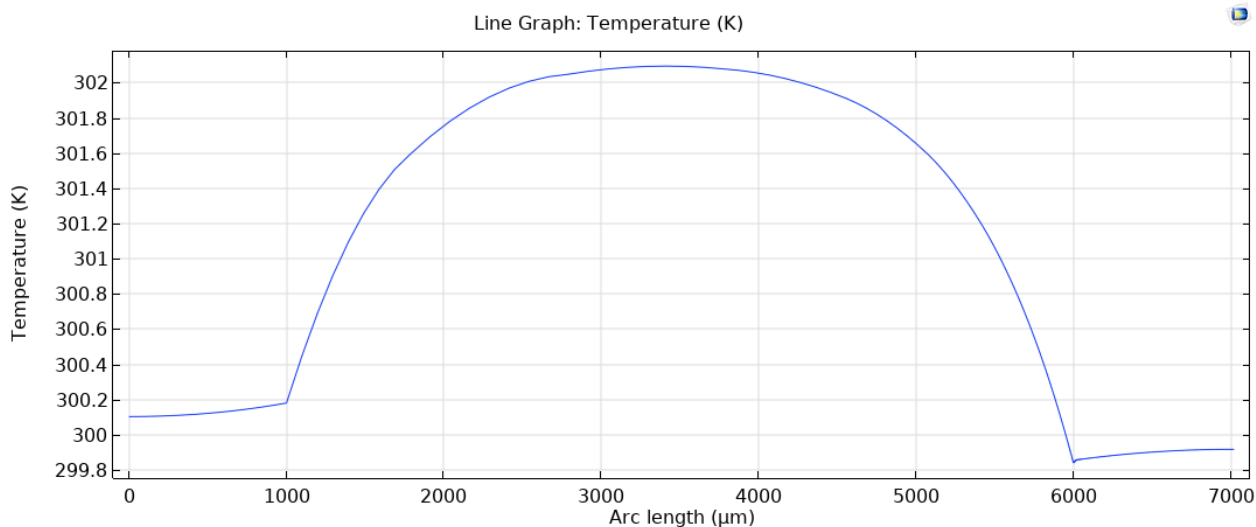


Рис. 9. Розподіл температури вздовж лінії руху вимірювального зонда по поверхні досліджуваної контактної структури при термостатуванні однієї з її поверхонь (для випадку зразка довжиною 5 мм та перерізом 1 мм², при струмі величиною 1А; контактний опір – 10⁻⁶ Ом·см²).

Залежність перепаду температур на зразку від величини струму через зразок для різної геометрії зразка наведено на рис. 10.

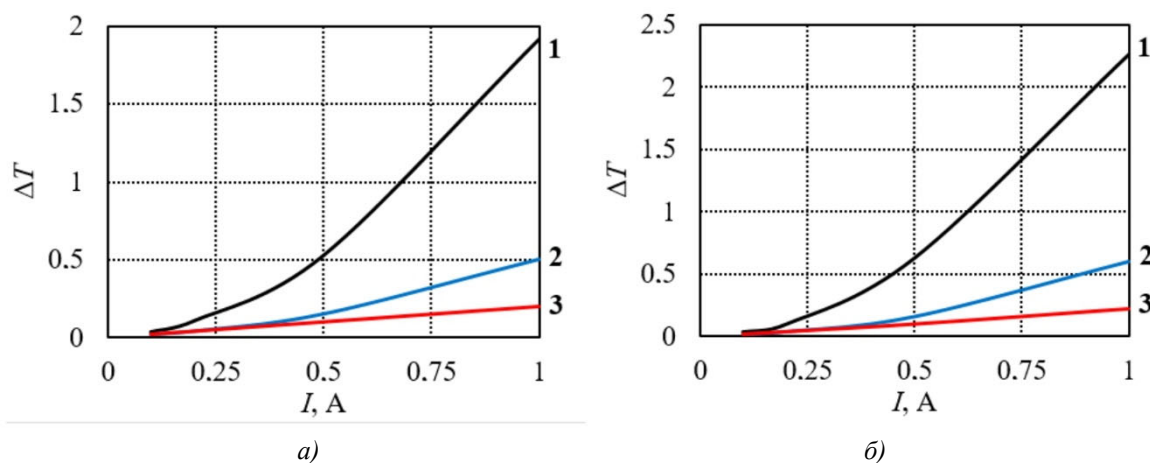


Рис. 10. Залежність перепаду температур на зразку від величини струму через зразок при термостатуванні однієї з його бічних поверхонь (для зразків довжиною 3 мм (а) та 5 мм (б)): Переріз зразка S: 1 – 1 x 1 мм²; 2 – 2 x 2 мм²; 3 – 3 x 3 мм².

Таким чином похибка визначення контактної опору, викликана неізотермічністю умов проведення вимірювань, значно знизиться – до величини ~ 8% (при контактному опорі 10⁻⁶ Ом·см²).

Додаткове покращення можна отримати, якщо використовувати зразки з прямокутним перерізом тієї ж площі та розташовувати їх на термостатованій поверхні ширшою стороною. Розподіли температури у досліджуваній контактній структурі та вздовж лінії руху вимірювального зонда для такого випадку наведено на рис. 11 та 12 (для довжини зразка 5 мм, перерізу 0.5 мм на 2 мм, при струмі величиною 1А; контактний опір – 10⁻⁶ Ом·см²).

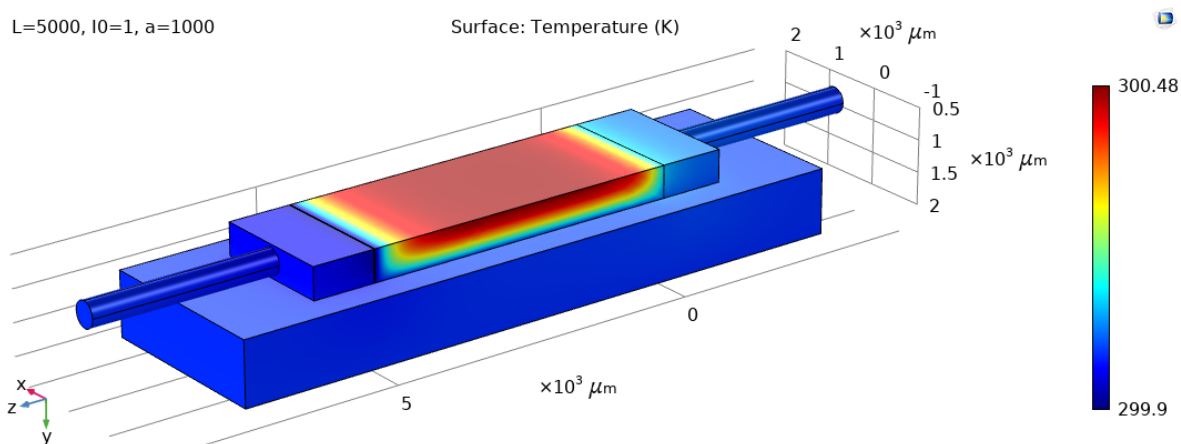


Рис. 11. Розподіл температури у досліджуваній контактній структурі при термостатуванні однієї з її поверхонь (для випадку зразка довжиною 5 мм та перерізом 0.5 мм на 2 мм, при струмі величиною 1 А; контактний опір – 10^{-6} Ом·см²).

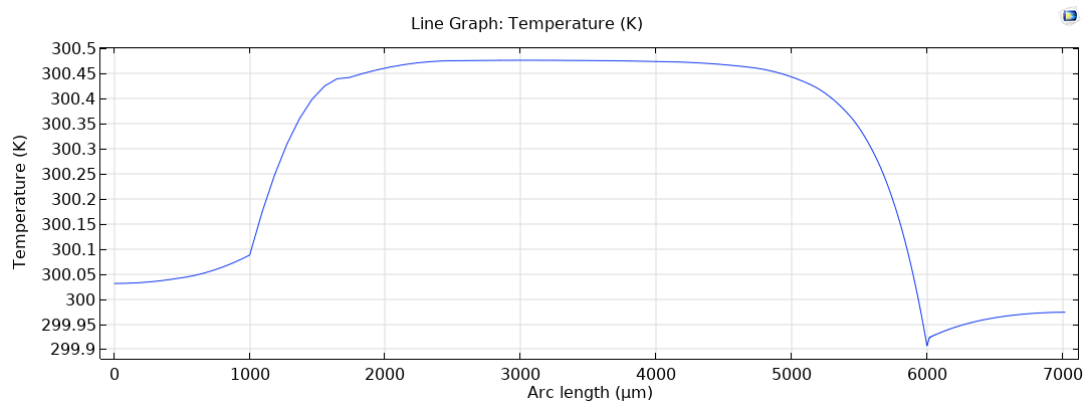


Рис. 12. Розподіл температури вздовж лінії руху вимірювального зонда по поверхні досліджуваної контактної структури при термостатуванні однієї з її поверхонь (для випадку зразка довжиною 5 мм та перерізом 0.5 мм на 2 мм, при струмі величиною 1 А; контактний опір – 10^{-6} Ом·см²).

У такому випадку похибка визначення контактного опору, викликана неізотермічністю умов проведення вимірювань, для зразка з перерізом 0.5 мм на 2 мм та довжиною 5 мм не перевищуватиме 2 %.

Висновки

1. Створено комп'ютерну модель для дослідження можливих похибок вимірювань електричного контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» зондовим методом. Шляхом комп'ютерного моделювання отримано розподіли електричного потенціалу та температури у досліджуваній фізичній моделі для різної геометрії зразків, величини струму через зразок та контактного електричного опору.
2. Встановлено, що відхилення від ізотермічних умов у зразку, викликані впливом ефектів Джоуля та Пельтьє, можуть призводити до дуже значних (понад 100 %) похибок при вимірюваннях, викликаних тим, що до вимірюваного омичного спаду напруги додаватиметься і термоЕРС, при чому величини термоЕРС та омичного спаду напруги на зразку будуть співвимірними.
3. Показано, що термостатування однієї зі сторін зразка дозволяє знизити похибки вимірювань

до 8 % для зразків з квадратним перерізом та до 2 % – для зразків з прямокутним перерізом аналогічної площі, розташованих ширшою стороною та термостаті (при контактному опорі 10^{-6} Ом·см²).

Література

1. Tritt T. (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. and Gorskyi P.V. (2019). Electrical resistance of metal contact to Bi_2Te_3 based thermoelectric legs. *Journal of Applied Physics*, 26, 64503-1 – 164503-8.
4. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Mitskaniuk N.V. (2019). Contact resistance due to potential barrier at thermoelectric material – metal boundary. *J. 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. Mykhailovsky V.Ya., Lysko V.V., Antoniuk V.V., Maksymuk M.V. (2017). Research on thermoelements based on *n-PbTe* and *p-TAGS* materials for thermoelectric generator cascade module. *J. Thermoelectricity*. 3, 37 – 44.
7. Anatyshuk, L.I., Lysko V.V. (2014). Methods for assuring high quality electric and thermal contacts when measuring parameters of thermoelectric materials. *J. Thermoelectricity*, 4, 83 – 90.
8. Anatyshuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. (2012). Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials. *J. Electronic Materials*, 41 (6). 1680 – 1685. <https://doi.org/10.1007/s11664-012-1973-1>.
9. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal-thermoelectric material” structures (part 1). *J. Thermoelectricity*, 2, 5 – 24.
10. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal-thermoelectric material” structures (part 2). *J. Thermoelectricity*, 3-4, 5 – 17.
11. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2020). *Thermoelectricity: Vol. 5. Metrology of Thermoelectric Materials*. Chernivtsi: Bukrek. ISBN 978-617-7770-40-3.
12. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials. *J. Electronic Materials*, 43 (10), 3863 – 3869. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3300-5>.

Надійшла до редакції: 11.12.2023.

Anatyshuk L.I., Acad. NAS Ukraine^{1,2}

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

Strusovskiy K.I.²

¹ Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str.,
Chernivtsi, 58029, Ukraine;

² Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskiy str.,
Chernivtsi, 58000, Ukraine
e-mail: anatysh@gmail.com

COMPUTER RESEARCH ON THE ACCURACY OF PROBE METHOD FOR MEASURING THE ELECTRICAL CONTACT RESISTANCE OF “METAL – THERMOELECTRIC MATERIAL”

Physical and computer models have been created to study possible errors in measuring the electrical contact resistance of “metal-thermoelectric material” using the probe method. By means of computer simulation, the distributions of electric potential and temperature in the studied physical model were obtained for different sample geometries, current through the sample, and contact electrical resistance. It has been found that deviations from isothermal conditions in the sample, caused by the influence of the Joule and Peltier effects, can lead to very significant (over 100 %) measurement errors. The possibilities of minimizing these errors by thermostating one side of the sample are considered. Bibl. 12, Figs. 14.

Key words: electrical contact resistance, measurement, computer simulation, accuracy, thermoelectric thermoelectric energy converters.

References

1. Tritt T. (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., Anatychuk L.I. and Gorskyi P.V. (2019). Electrical resistance of metal contact to Bi_2Te_3 based thermoelectric legs. *Journal of Applied Physics*, 26, 64503-1 – 164503-8.
4. Anatychuk L.I., Vikhor L.M., Mitskaniuk N.V. (2019). Contact resistance due to potential barrier at thermoelectric material – metal boundary. *J. 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. Mykhailovsky V.Ya., Lysko V.V., Antoniuk V.V., Maksymuk M.V. (2017). Research on thermoelements based on *n-PbTe* and *p-TAGS* materials for thermoelectric generator cascade module. *J. Thermoelectricity*. 3, 37 – 44.
7. Anatychuk, L.I., Lysko V.V. (2014). Methods for assuring high quality electric and thermal contacts when measuring parameters of thermoelectric materials. *J. Thermoelectricity*, 4, 83 – 90.
8. Anatychuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. (2012). Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials. *J. Electronic Materials*, 41 (6). 1680 – 1685. <https://doi.org/10.1007/s11664-012-1973-1>.
9. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal-thermoelectric material” structures (part 1). *J. Thermoelectricity*, 2, 5 – 24.
10. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal-thermoelectric material” structures (part 2). *J. Thermoelectricity*, 3-4, 5 – 17.
11. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2020). *Thermoelectricity: Vol. 5. Metrology of Thermoelectric Materials*. Chernivtsi: Bukrek. ISBN 978-617-7770-40-3.
12. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2014). On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials. *J. Electronic Materials*, 43 (10), 3863 – 3869. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3300-5>.

Submitted: 11.12.2023.