

УДК 53.08

Анатичук Л.І., акад. НАН України^{1,2}

Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

Запаров С.Ф.,¹

Кречун М.М.^{1,2}

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

МЕТОДИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ЗРАЗКІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МАТЕРІАЛУ ДО ВИМІРЮВАНЬ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АБСОЛЮТНИМ МЕТОДОМ

Показана важливість якісної підготовки досліджуваних зразків термоелектричних матеріалів до вимірювань їх властивостей комплексним абсолютним методом. Наведено вимоги до досліджуваних зразків, а також опис методів та обладнання для виготовлення зразків, які задовольнятимуть цим вимогам. Бібл. 27, рис. 11.

Ключові слова: вимірювання, електропровідність, коефіцієнт термоЕРС, теплопровідність, добротність, абсолютний метод.

Вступ

Важливість вдосконалення методів та обладнання для вимірювання властивостей термоелектричних матеріалів важко переоцінити. Високі вимоги до точності вимірювальної апаратури висуваються як при вирішенні задач пошуку нових та оптимізації відомих термоелектричних матеріалів для підвищення їх термоелектричної добротності [1 – 3], так і при виборі оптимального термоелектричного матеріалу для конкретних практичних застосувань термоелектричних перетворювачів енергії [4 – 13].

Одним з найкращих для визначення термоелектричних властивостей матеріалів (електропровідності σ , коефіцієнту термоЕРС α , теплопровідності κ та добротності Z) є комплексний абсолютний метод [14 – 16]. Він широко використовується при створенні еталонів і володіє важливими перевагами: вимірювання σ , α , κ , Z виконуються одночасно на одному зразку, що знижує похибки; для виміру можуть бути використані зразки невеликих розмірів; термоелектричні параметри знаходяться з класичних формул без внесення поправок.

В роботах [17 – 26] наведено результати комплексних досліджень, проведених в Інституті термоелектрики НАН України та МОН України, направлених на розробку методів мінімізації похибок абсолютного методу. Результатом цих досліджень є створення вимірювального обладнання «АЛТЕК-10001» (рис. 1), точність якого у визначенні добротності у 3 – 5 разів переважає точність вимірювання при використанні інших методів, зокрема, методу Хармана [27].

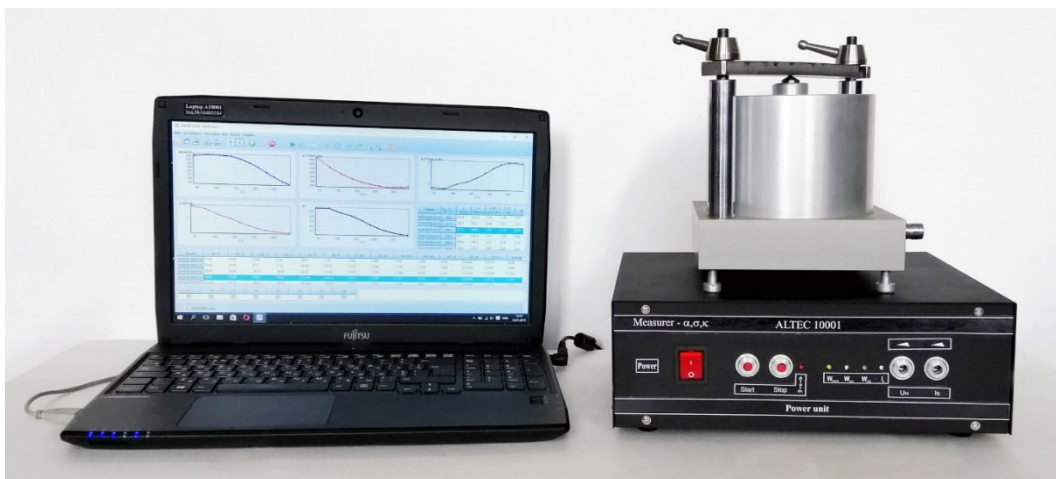


Рис. 1. Установка «АЛТЕК-10001» для вимірювань термоелектричних властивостей матеріалів комплексним абсолютним методом, розроблена в Інституті термоелектрики НАН та МОН України.

З аналізу можливих похибок вимірювань, випливає необхідність забезпечення високих вимог, які висуваються до вимірюваного зразка – точності його розмірів, правильності форми, якості його поверхні, однорідності та ін. Виключно важливим є створення якісних електричних та теплових контактів на торцевих поверхнях зразка та монтаж термопар на його бічній поверхні. Однак, забезпеченню дотримання цих вимог не завжди приділяється належна увага, хоча відхилення від них призводять до настільки значних похибок, що можуть стати марними застосування всіх необхідних методів підвищення точності вимірювань.

Тому метою цієї роботи була розробка спеціальних методів та обладнання для підготовки зразків до вимірювань.

1. Вимоги до досліджуваних зразків термоелектричного матеріалу

На рис. 2 наведено схему комплексного абсолютного методу, взятого за основу при створенні установки «АЛТЕК-10001». Термоелектричні параметри досліджуваного зразка визначаються з формул

$$\sigma = \frac{I l}{U S}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{E_a}{T_h - T_c}, \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{I_0 \cdot U_0}{T_h - T_c} \frac{l}{S}, \quad (3)$$

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad (4)$$

де l – віддаль між зондами-термопарами; S – площа поперечного перерізу зразка; I , U – струм через зразок та падіння напруги між вимірювальними зондами при визначенні електропровідності; E_a – термоЕРС між однаковими гілками зондів-термопар; T_h і T_c – «гаряча» та «холодна» температури у зразку; I_0 , U_0 – струм та напруга живлення еталонного нагрівника.

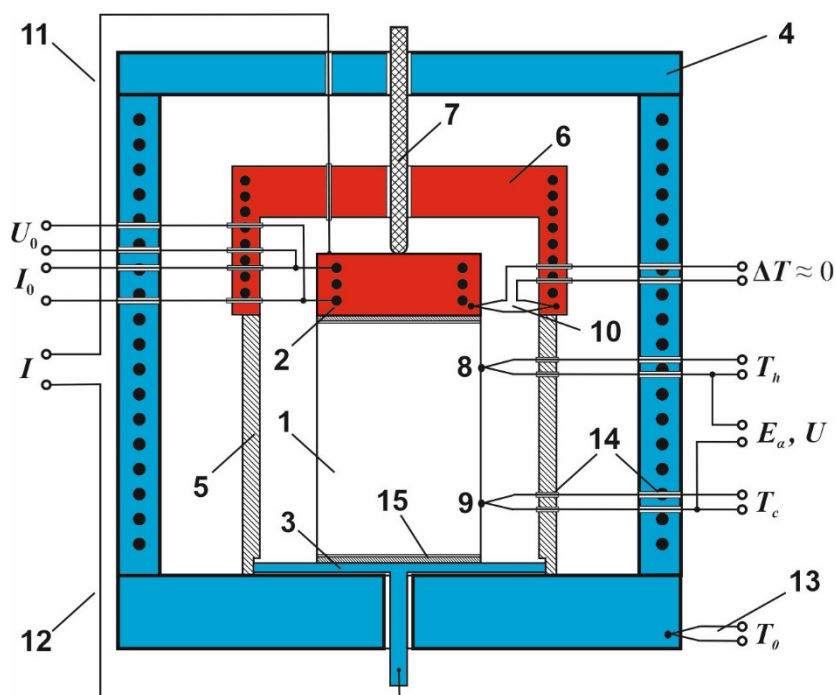


Рис. 2. Комплексний абсолютний метод вимірювання термоелектричних параметрів матеріалів:

1 – досліджуваний зразок; 2 – еталонний нагрівник; 3 – посадочна площадка;

4 – термостат; 5 – екран; 6 – нагрівник екрану; 7 – притискач; 8, 9 – вимірювальні зонди-термопари;

10 – нуль-термопара; 11, 12 – струмопідводи зразка; 13 – термопара терморегулятора термостату;

14 – теплові ключі; 15 – контактні структури.

У роботах [17, 18] детально розглянуто вплив різних фізичних факторів на точність вимірювань параметрів термоелектричних матеріалів, в першу чергу теплопровідності та електропровідності, в залежності від геометричних розмірів зразків та елементів конструкції вимірювальної комірки. Показано, що похибки вимірювань можуть бути суттєвими, понад 50 %, якщо не вживати спеціальних засобів для їх усунення.

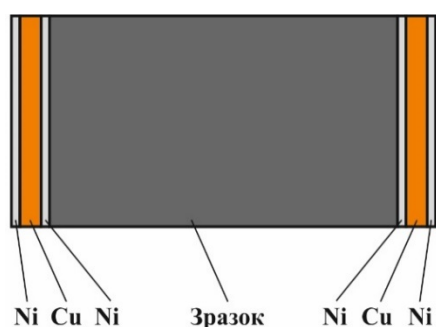


Рис. 3. Контактні структури для

вимірювань термоелектричних властивостей матеріалу абсолютним методом.

Встановлено, що оптимальними для забезпечення мінімальних похибок вимірювань та часу встановлення стаціонарних умов є зразки циліндричної форми з діаметром 6 – 8 мм. При цьому довжина зразка повинна бути принаймні в 2 рази більшою за діаметр зразка, а відстань між зондами не повинна перевищувати $\frac{1}{3}$ довжини зразка.

Крім того, як показано у роботі [19], для досягнення одновимірного розподілу електричного струму та теплового потоку у зразку необхідна металізація торців зразка. Шари повинні бути стійкими до температурних впливів в усьому робочому інтервалі вимірювань та мати досить добру адгезію та

антидифузійні властивості. Визначено набір металевих покриттів (рис. 3), що забезпечує прийнятні величини похибок вимірювань теплопровідності та електропровідності. Оптимальна контактна структура, що створюється на торцях зразка, складається з антидифузійних шарів нікелю товщиною ~ 10 мкм та шару міді товщиною ~ 100 мкм.

2. Виготовлення зразків термоелектричного матеріалу

Процес різання термоелектричного матеріалу має свої специфічні особливості, тому пряме використання сучасного серійного обладнання для різання напівпровідників не завжди виправдане стосовно термоелектричного матеріалу.

В Інституті термоелектрики НАН та МОН України розроблено малогабаритний настільний верстат «АЛТЕК–13009» для розрізування термоелектричного матеріалу вільним та зв'язаним абразивом.

Основа ріжучого інструменту – змінна рамка 1 (рис. 4), виготовлена з високоміцного алюмінієвого сплаву. На рамку намотується вольфрамовий дріт 3. Віддаль між дротинами задається пазами розмірних планок 2. На поверхню дроту наноситься алмазний мікропорошок.

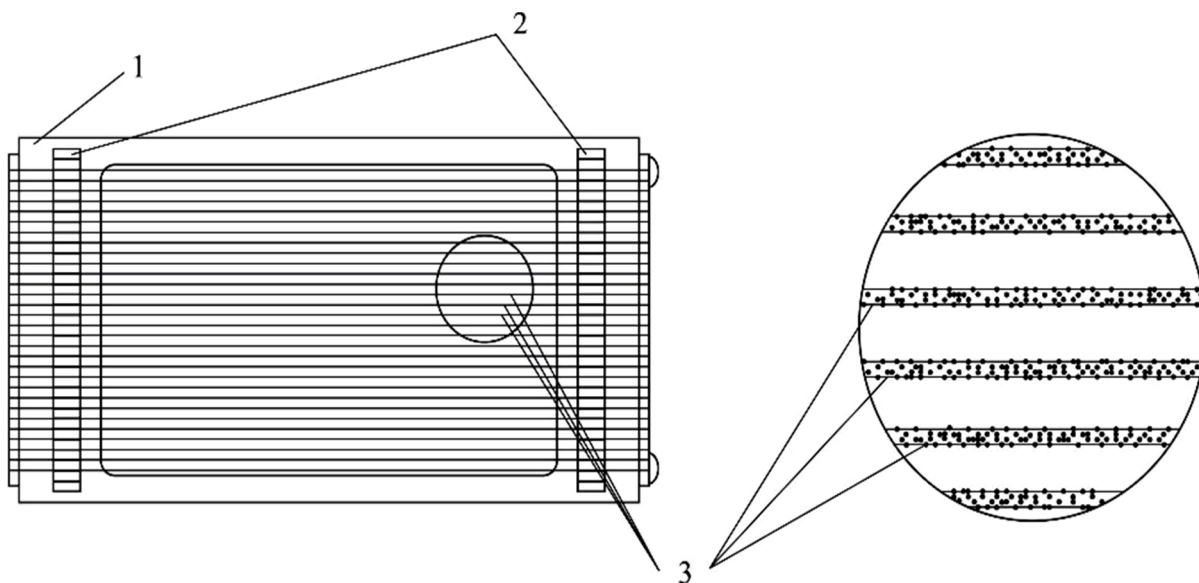


Рис. 4. Інструмент для різання струнами з закріпленими алмазними зернами: 1 – інструмент, 2 – розмірні планки, 3 – струни з закріпленими алмазними зернами.

Малогабаритний настільний верстат призначено для отримання у лабораторних умовах зразків прямокутної форми з термоелектричного матеріалу (рис. 5). Схему верстату наведено на рис. 6.

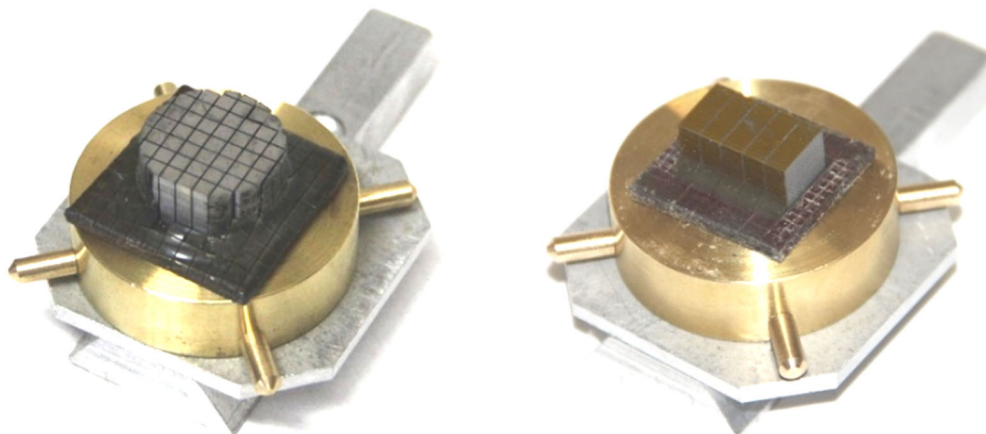


Рис. 5. Зовнішній вигляд результату розрізання термоелектричного матеріалу настільним верстатом «АЛТЕК–13009».

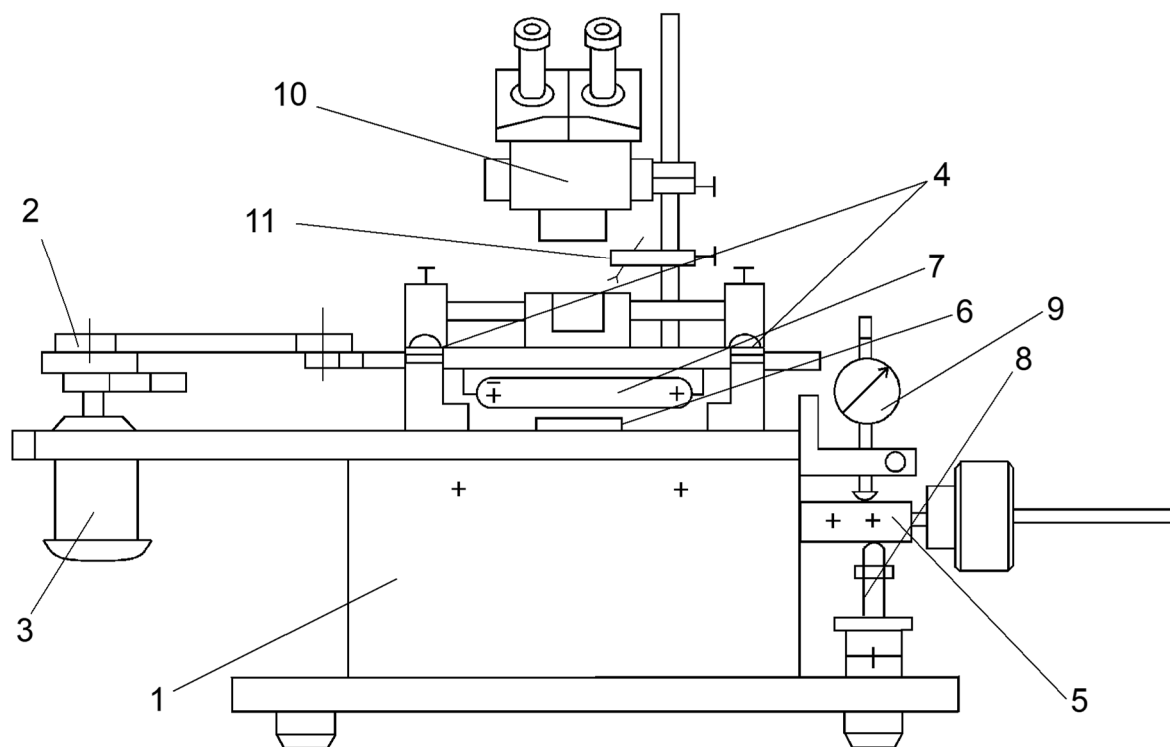


Рис. 6. Схема малогабаритного настільного верстату для різання термоелектричного матеріалу:

- 1 – станина; 2 – блок приводу; 3 – електродвигун; 4 – вузол кріплення каретки;
5 – механізм підйому-опускання столу; 6 – розрізуваний матеріал; 7 – ріжучий інструмент;
8 – система регулювання та контролю глибини різу; 9 – індикатор; 10 – мікроскоп;
11 – подача охолоджувальної рідини.

Робочим інструментом верстату є рамка з паралельно розташованими на ній дротинами. Напрямними, встановленими на рамці, задається потрібна віддаль між дротинами і, відповідно, розміри зразків. Верстат дозволяє виконувати розрізання в умовах малих деформуючих впливів. Цим досягаються незначні порушення приповерхневих шарів матеріалу.

Кріплення рамки на рухомій каретці здійснюється двома притискними гайками. Цими ж гайками ріжучі струни виставляються паралельно до напрямку руху інструменту. Підшипникове ковзання напрямних каретки забезпечує точність та легкість їх зворотно-поступального руху.

Верстат складається з каретки з ріжучим інструментом 7, зворотно-поступальний рух якої здійснюється блоком приводу 2 від електродвигуна 3; вузлів кріплення каретки 4; механізму підйому-опускання столу 5 з противагою регулювання тиску на кромку ріжучого інструменту; системи регулювання глибини різу 8, індикатора 9 для контролю глибини розрізання; пристосування для подачі охолоджувальної рідини 11. Початок та кінець процесу розрізання контролюється індикатором 9. Зовнішній вигляд малогабаритного настільного верстату «АЛТЕК-13009» наведено на рис. 7.

Похибка при розрізанні термоелектричного матеріалу вільним абразивом складає ± 0.01 мм за глибини порушення приповерхневого шару 5 – 15 мкм; при використанні ріжучого інструменту з нанесеним алмазним абразивом – ± 0.02 мм за глибини порушення приповерхневого шару 10 – 25 мкм.

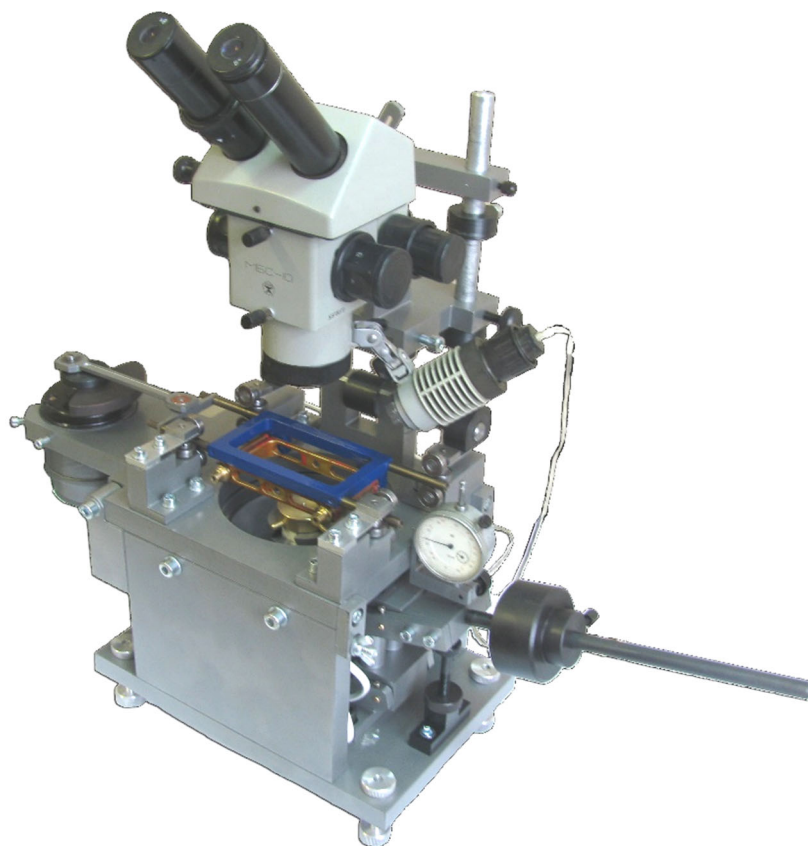


Рис. 7. Зовнішній вигляд малогабаритного настільного верстату «АЛТЕК-13009».

Для створення круглих зразків спочатку на верстаті «АЛТЕК-13009» створюється заготовка у вигляді багатогранника (рис. 8), яка вручну доводиться до циліндру на оснащенні для шліфування, зображеній на рис. 9.

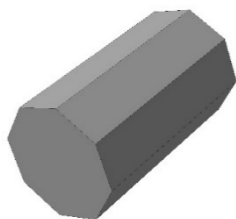


Рис. 8. Заготовка з термоелектричного матеріалу у вигляді багатогранника.

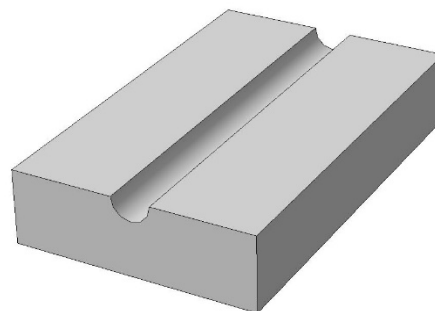


Рис. 9. Оснащення для шліфування бічної поверхні багатогранної заготовки.

Точність геометричних розмірів зразка контролюється інструментальним мікроскопом 10 з роздільною здатністю 0.001 мм.

3. Створення контактних структур на торцевих поверхнях досліджуваних зразків

Перед нанесенням металевих покриттів поверхні торців зразка слід звільнити від порушених деформованих шарів, які утворюються при розрізанні матеріалу. В залежності від методів розрізання глибина порушених шарів різна. Приклад впливу способу розрізання на глибину порушеного шару наведено в таблиці 1.

Порушені шари істотно впливають на величину контактних електричних та теплових опорів і, отже, на відтворюваність та похибку вимірювань. Тому, перед нанесенням металевих покриттів, порушені шари слід видалити механічною обробкою з наступним хімічним або електрохімічним травленням.

Таблиця 1

*Вплив способу різання на глибину деформованих шарів
термоелектричного матеріалу на основі Bi_2Te_3*

№ п/п	Спосіб різання	Глибина деформованих шарів h , мкм	
		n -тип	p -тип
1.	Електроерозійний	2 – 5	5 – 10
2.	Струна з вільним абразивом	15 – 20	20 – 30
3.	Алмазний диск	40 – 50	50 – 80

Зовнішній вигляд установки для створення контактних структур на вимірюваних зразках наведено на рис. 10.

Установка містить: три посудини з електролітами – для нанесення нікелевого та мідного покриттів, а також попереднього травлення поверхні зразка; джерело постійного струму; вимірювальні прилади для контролю величини струму при травленні та нанесенні покриттів.



Рис. 10. Зовнішній вигляд установки для створення контактних структур на вимірюваних зразках термоелектричних матеріалів.

Процес створення контактної структури включає наступні етапи:

- механічну обробку поверхні торців зразка шляхом шліфування порошком з фракцією до 20 мкм;
- вміщення зразка в оснащення, яке захищає бічну поверхню зразка і створює електричний вивід від бічної поверхні зразка до джерела струму;
- електрохімічне травлення торців зразка;
- ультразвукове очищення поверхні торців зразка;
- нанесення нікелевого шару товщиною близько 10 мкм;
- нанесення мідного шару товщиною не менше від 100 мкм;
- нанесення нікелевого шару товщиною близько 10 мкм.

Склад електролітів підбирається індивідуально для кожного термоелектричного матеріалу. Наприклад, для термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 для електрохімічного травлення може бути використаний водний розчин гідроксиду калію (KOH – 150 г/л) і цитрату натрію ($NaC_3H_4(CO_2H)_3$ – 100 г/л); температура розчину 18 – 25 °С, густина струму $D_k = 20$ А/дм², аноди виготовлені з нержавіючої сталі. Для нанесення шарів нікелю використовують електроліт складу: нікель (II) сульфат семиводний ($NiSO_4 \cdot 7H_2O$) – 150 г/л; калій хлорид (KCl) – 14 г/л; натрій сульфат десятиводний ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) – 70 г/л; магній сульфат семиводний ($MgSO_4 \cdot 10H_2O$) – 15 г/л; борна кислота (H_3BO_3) – 25 г/л. Катодна густина струму $= D_k = 0.5 - 1.5$ А/дм², температура електроліту = 18 – 25 °С; pH 4.5 – 5.5, швидкість осадження електроліту ~ 10 мкм/год. Як аноди використовуються нікелеві пластини, співвідношення площі анода до площі катода становить ~ 2:1. Нікелювання проводиться при безперервній фільтрації та інтенсивному перемішуванні електроліту. Мідне покриття наноситься з електроліту складу: сульфат міді (II) п'ятиводний ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) – 200 г/л; сульфатна кислота (H_2SO_4) – 50 г/л. Температура електроліту = 18 – 25 °С катодна струму $D_k = 1 - 2$ А/дм², швидкість осадження електроліту ~ 10 – 15 мкм/год, аноди з чистої електролітичної міді.

Орієнтовний загальний час нанесення контактної структури Ni (~ 10 мкм) – Cu (~ 100 мкм) – Ni (~ 10 мкм) складає близько 8 – 10 годин.

Підготовлений таким чином зразок термоелектричного матеріалу розміщується у вимірювальній комірці установки «АЛТЕК-10001» (рис. 11).

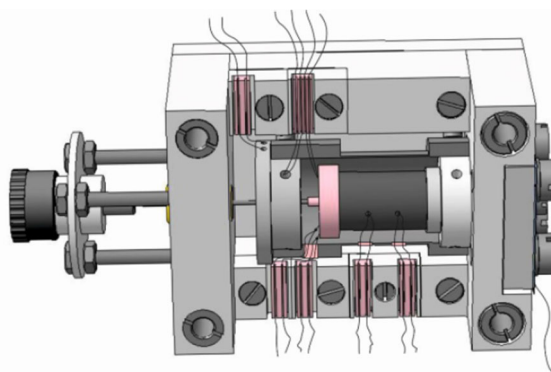


Рис. 11. Розміщення досліджуваного зразка термоелектричного матеріалу у вимірювальній комірці установки «АЛТЕК-10001».

Наведене спеціальне обладнання для підготовки зразків дозволяє забезпечити умови вимірювань, що необхідні для реалізації можливостей комплексного абсолютного методу, та є невід'ємною частиною загальної стратегії вимірювань.

Висновки

1. Наведено вимоги до підготовки досліджуваних зразків термоелектричних матеріалів до вимірювань їх властивостей комплексним абсолютним методом.
2. Оптимальними для забезпечення мінімальних похибок вимірювань та часу встановлення стаціонарних умов є зразки циліндричної форми з діаметром 6 – 8 мм, довжиною принаймні в 2 рази більшою за діаметр зразка та відстанню між зондами рівною ~ $\frac{1}{3}$ довжини зразка. Наведено опис малогабаритного настільного станка для розрізування термоелектричного матеріалу, що дозволяє виготовляти зразки необхідної геометрії.
3. Для досягнення одновимірного розподілу електричного струму та теплового потоку у зразку

необхідна металізація торців зразка. Оптимальна контактна структура, що створюється на торцях зразка, складається з антидифузійних шарів нікелю товщиною ~ 10 мкм та шару міді товщиною ~ 100 мкм. Наведено опис установки для гальванічного нанесення необхідних контактних структур та методики її використання.

Література

1. Tritt T. (2000). *Recent trends in thermoelectric materials research, Part Two (Semiconductors and Semimetals, Volume 70)*. Academic Press, 2000. 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. Anatyshuk L.I. and Vikhor L.N. (2012). *Thermoelectricity Vol. 4. Functionally Graded Thermoelectric Materials*. Institute of Thermoelectricity, Chernivtsi, Ukraine. ISBN 978-966-399-411-6.
4. Baitinger M., Hong Duong Nguyen, Candolfi C., Antonyshyn I., Meier-Kirchner K., Veremchuk I., Razinkov V., Havryluk M., Cardoso-Gil R., Burkhardt U., Bohme B., Anatyshuk L., Grin Y. (2021). Thermoelectric characterization of the clathrate-I solid solution $\text{Ba}_{8-\delta}\text{Au}_x\text{Ge}_{46-x}$. *Applied Physics Letters*, 119, Article № 063902, 1 – 6.
5. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2012). Materials for vehicular thermoelectric generators. *J. Electronic Materials*, 41 (6), 1778 – 1784.
6. Anatyshuk L.I., Cherkez R.G. (2012). Energy potential of permeable segmented thermoelements in cooling mode. *J. Electronic Materials*, 41 (6), 1115 – 1119.
7. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N., Strutynska L.T., Termena I.S. (2011). Segmented generator modules using Bi_2Te_3 -based materials. *J. Electronic Materials*, 40 (5), 957 – 961.
8. Vikhor L.N., Anatyshuk L.I. (2009). Generator modules of segmented thermoelements. *Energy Conversion and Management*, 50 (9), 2366 – 2372.
9. Anatyshuk L.I., Hwang Jenn-Dong, Lysko V.V., Prybyla A.V. (2013). Thermoelectric heat recuperators for cement kilns. *J. Thermoelectricity*, 5, 36 – 42.
10. Mikhailovsky V.Ya., Kuz R.V., Lysko V.V., Maksimuk M.V., Mochernyuk R.M. (2014). Thermoelectric generator modules on $n\text{-InSe}$ and $p\text{-PbTe}$ -based materials for the level of operating temperatures 30 – 500 °C. *J. Thermoelectricity*, 5, 37 – 48.
11. Mykhailovsky V.Ya., Lysko V.V., Antoniuk V.V., Maksymuk M.V. (2017). Research on thermoelements based on $n\text{-PbTe}$ and $p\text{-TAGS}$ materials for thermoelectric generator cascade module. *J. Thermoelectricity*, 3, 37 – 44.
12. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Kravtsov S.O. (2019). Design of thermoelectric generator for transport high-power starting preheater. *J. Thermoelectricity*, 5, 17 – 36.
13. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2021). Computer design of a thermoelectric generator for heat and electricity supply to heavy-duty vehicles. *J. Thermoelectricity*, 2, 79 – 88.
14. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2020). *Thermoelectricity: Vol. 5. Metrology of Thermoelectric Materials*. – Chernivtsi: Bukrek. ISBN 978-617-7770-40-3.
15. 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>.
16. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2015). Absolute method for measuring of thermoelectric properties of materials. *Materials Today: Proceedings*, 2 (2), 737 – 743.

- <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.110>.
17. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 1, 65 – 73.
 18. Lysko V.V. (2017). On the errors in measurement of electrical conductivity of thermoelectric material samples by two-probe method. *J. Thermoelectricity*, 6, 73 – 83.
 19. 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.
 20. Anatyshuk L.I., Havrylyuk M.V., Lysko V.V., Senyuk Yu.I. (2013). Measurement of thermoelectric properties of materials at high temperatures. *J. Thermoelectricity*, 6, 66 – 71.
 21. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). Increasing the rapidity of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 5, 86 – 92.
 22. Lysko V.V. (2016). The temperature dependences of errors in measuring thermal conductivity by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 2, 66 – 73.
 23. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2017). Method for compensation of the influence of the Peltier effect when measuring the electrical conductivity by two-probe method. *J. Thermoelectricity*, 4, 92 – 100.
 24. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2018). Ways for quality improvement in the measurement of thermoelectric material properties by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 2, 90 – 100.
 25. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V., Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *J. Thermoelectricity*, 3, 80 – 100.
 26. 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>.
 27. Lysko V.V. (2016). Analysis of errors in determining the thermoelectric properties of materials by the Harman method. *J. Thermoelectricity*, 3, 75 – 86.

Надійшла до редакції: 23.08.2022.

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

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

Zaparov S.F.¹,

Krechun M.M.^{1,2}

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

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

**METHODS AND EQUIPMENT FOR THE PREPARATION
OF THERMOELECTRIC MATERIAL SAMPLES FOR MEASURING
THEIR PROPERTIES BY THE ABSOLUTE METHOD**

The importance of high-quality preparation of the studied samples of thermoelectric materials for measuring their properties using a complex absolute method is shown. The requirements for the samples under study are given, as well as a description of the methods and equipment for producing samples that meet these requirements. Bibl. 27, Figs. 11.

Key words: measurement, electric conductivity, Seebeck coefficient, thermal conductivity, figure of merit, absolute method.

References

1. Tritt T. (2000). *Recent trends in thermoelectric materials research, Part Two (Semiconductors and Semimetals, Volume 70)*. Academic Press, 2000. 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. Anatyshuk L.I. and Vikhor L.N. (2012). *Thermoelectricity Vol. 4. Functionally Graded Thermoelectric Materials*. Institute of Thermoelectricity, Chernivtsi, Ukraine. ISBN 978-966-399-411-6.
4. Baitinger M., Hong Duong Nguyen, Candolfi C., Antonyshyn I., Meier-Kirchner K., Veremchuk I., Razinkov V., Havryluk M., Cardoso-Gil R., Burkhardt U., Bohme B., Anatyshuk L., Grin Y. (2021). Thermoelectric characterization of the clathrate-I solid solution $\text{Ba}_{8-\delta}\text{Au}_x\text{Ge}_{46-x}$. *Applied Physics Letters*, 119, Article № 063902, 1 – 6.
5. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2012). Materials for vehicular thermoelectric generators. *J. Electronic Materials*, 41 (6), 1778 – 1784.
6. Anatyshuk L.I., Cherkez R.G. (2012). Energy potential of permeable segmented thermoelements in cooling mode. *J. Electronic Materials*, 41 (6), 1115 – 1119.
7. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N., Strutynska L.T., Termena I.S. (2011). Segmented generator modules using Bi_2Te_3 -based materials. *J. Electronic Materials*, 40 (5), 957 – 961.
8. Vikhor L.N., Anatyshuk L.I. (2009). Generator modules of segmented thermoelements. *Energy Conversion and Management*, 50 (9), 2366 – 2372.
9. Anatyshuk L.I., Hwang Jenn-Dong, Lysko V.V., Prybyla A.V. (2013). Thermoelectric heat recuperators for cement kilns. *J. Thermoelectricity*, 5, 36 – 42.
10. Mikhailovsky V.Ya., Kuz R.V., Lysko V.V., Maksimuk M.V., Mochernyuk R.M. (2014). Thermoelectric generator modules on *n-InSe* and *p-PbTe*-based materials for the level of operating temperatures 30 – 500 °C. *J. Thermoelectricity*, 5, 37 – 48.
11. 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.
12. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Kravtsov S.O. (2019). Design of thermoelectric generator for transport high-power starting preheater. *J. Thermoelectricity*, 5, 17 – 36.
13. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2021). Computer design of a thermoelectric generator for heat and electricity supply to heavy-duty vehicles. *J. Thermoelectricity*, 2, 79 – 88.
14. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2020). *Thermoelectricity: Vol. 5. Metrology of Thermoelectric Materials*. – Chernivtsi: Bukrek. ISBN 978-617-7770-40-3.
15. 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>.
16. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2015). Absolute method for measuring of

- thermoelectric properties of materials. *Materials Today: Proceedings*, 2 (2), 737 – 743. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.110>.
17. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 1, 65 – 73.
 18. Lysko V.V. (2017). On the errors in measurement of electrical conductivity of thermoelectric material samples by two-probe method. *J. Thermoelectricity*, 6, 73 – 83.
 19. 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.
 20. Anatyshuk L.I., Havrylyuk M.V., Lysko V.V., Senyuk Yu.I. (2013). Measurement of thermoelectric properties of materials at high temperatures. *J. Thermoelectricity*, 6, 66 – 71.
 21. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). Increasing the rapidity of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 5, 86 – 92.
 22. Lysko V.V. (2016). The temperature dependences of errors in measuring thermal conductivity by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 2, 66 – 73.
 23. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2017). Method for compensation of the influence of the Peltier effect when measuring the electrical conductivity by two-probe method. *J. Thermoelectricity*, 4, 92 – 100.
 24. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2018). Ways for quality improvement in the measurement of thermoelectric material properties by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 2, 90 – 100.
 25. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V., Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *J. Thermoelectricity*, 3, 80 – 100.
 26. 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>.
 27. Lysko V.V. (2016). Analysis of errors in determining the thermoelectric properties of materials by the Harman method. *J. Thermoelectricity*, 3, 75 – 86.

Submitted: 23.08.2022.