

УДК 67.02



Запаров С.Ф.

**Запаров С.Ф.**

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

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ  
РОЗРІЗАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МАТЕРІАЛУ  
НА ОСНОВІ  $Bi_2Te_3$  ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИМ МЕТОДОМ І  
ДРОТОМ ІЗ НАНЕСЕНИМ АБРАЗИВОМ**

---

*Проблема підвищення надійності термоелектричних модулів охолодження, генераторних модулів, віток які містять напівпровідниковий термоелектричний матеріал на основі  $Bi_2Te_3$  залишається актуальною. Зростання показників надійності досягається, з одного боку, схемно-конструктивними рішеннями, з іншого боку – вибором технології виробництва й підтримкою досягнутого рівня надійності при експлуатації. Технологічний процес виготовлення напівпровідникових термоелектричних віток n- і p- типів досить відпрацьований і якість тут насамперед забезпечується високим рівнем технологічного устаткування й кваліфікацією персоналу. Зроблено порівняльний аналіз розмірної обробки термоелектричного матеріалу на основі  $Bi_2Te_3$  електроіскровим методом і струнами з нанесеними алмазними зернами. Визначено оптимальні способи розрізання ТЕМ на диски і вітки, що забезпечують найкращу якість зі збереженням високої продуктивності. Показано перевагу методу розрізання струною із нанесеним абразивом.*

**Ключові слова:** методи обробки ТЕМ, порівняльний аналіз.

*The problem of quality enhancement of thermoelectric cooling modules and generator modules whose legs comprise  $Bi_2Te_3$ -based semiconductor thermoelectric material continues to be relevant. On the one hand, quality enhancement and cost reduction of thermoelectric modules is attained by design solutions, on the other hand, by selection of manufacturing process and maintenance of the achieved reliability level in operation. The process of manufacturing semiconductor thermoelectric legs of n- and p-types is adequately tried and tested, and quality here is primarily assured by the level of technological equipment and staff qualification. Comparative analysis is performed of  $Bi_2Te_3$ -based thermoelectric material dimensional processing using electric spark method and diamond-coated wires. The optimal methods for cutting thermoelectric material (TEM) into discs and legs providing for the best quality with retention of high throughput are determined. The advantage of cutting method using a wire with bound abrasive is demonstrated.*

**Key words:** TEM processing methods, TEM processing tools, benefits and drawbacks.

## Вступ

У виробництві термоелектричних модулів широко використовується така технологічна схема:

- одержання направлених термоелектричних кристалів зі сплавів або вихідних напівпровідникових матеріалів;

- розрізання злитків на диски, диски на напів-елементи термоелектричного матеріалу  $n$ -і  $p$ -типів одним із бездефектних методів (електроерозійним – із дровтовим електродом або механічним – з використанням дроту зі зв'язаним абразивом, алмазними дисками);
- обробка (підготовка) поверхні й лудіння віток термоелементів;
- одержання малюнка металізації на керамічних теплопереходах;
- одночасна комутація ТЕМ у пристрої (кондукторі).

Властивості порушених шарів істотно відрізняються від властивостей основного матеріалу, ці шари містять безліч дефектів, внаслідок чого добротність термоелектричного матеріалу в приповерхньому шарі є значно нижчою, ніж в об'ємі. Таким чином, кожна з отриманих віток – це паралелепіпед, оточений поверхневим шаром матеріалу з погіршеними параметрами.

Мета роботи – порівняльний аналіз розмірної обробки термоелектричного матеріалу двома методами, (електроерозійним і дротом з нанесеними алмазними зернами), їх переваги й недоліки.

### Електроерозійна обробка

Електроерозійна обробка – контрольоване руйнування матеріалу під дією електричних розрядів, що утворюються внаслідок протікання імпульсного струму із частотою  $\sim 240$  кГц між електродами 1, 2 (рис. 1), що перебувають у безпосередній близькості один від одного в середовищі рідкого діелектрика, тобто обробка через електричну ерозію. У результаті цих розрядів з матеріалу вибиваються мікрочастинки, які виносяться з міжелектродного зазору струменем діелектрика. Крім цього, діелектрик відіграє роль каталізатора процесу розпаду, тому що за високої температури розряду в зоні ерозії перетворюється в пару. До цих методів відносять електроімпульсну, електроконтактну обробку, високочастотну електроіскрову й електроіскрову.

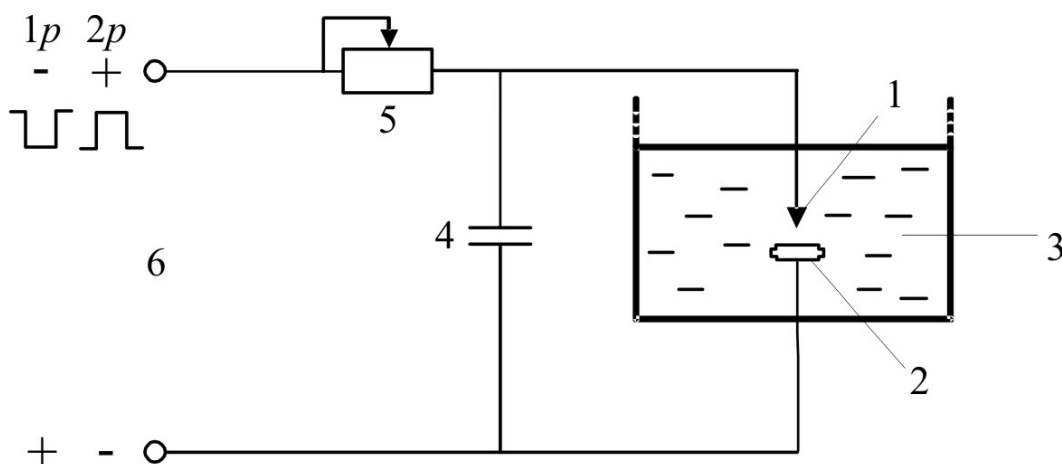


Рис. 1 Схема електроерозійної обробки матеріалу:

- 1 – електрод-інструмент, 2 – оброблюваний матеріал, 3 – середовище, в якому проводиться розряд, 4-конденсатор, 5-реостат, 6-джерело живлення,  
 1р – режим електроіскрової обробки, 2р – режим електроімпульсної обробки.

За **електроімпульсної обробки** використовують електричні імпульси великої тривалості (500 – 10000 мкс), у результаті чого відбувається дуговий розряд. Електроімпульсну обробку доцільно застосовувати за попередньої обробки штампів, турбінних лопаток, фасонних деталей з жаростійких сплавів.

Електроконтактна обробка заснована на локальному нагріванні заготовки в місці контакту з електродом-інструментом та видаленні розм'якшеного або навіть розплавленого металу із зони обробки механічним способом – відносним рухом заготовки та інструмента. Джерелом теплоти в зоні обробки служать імпульсні дугові розряди. Електроконтактну обробку оплавленням рекомендують для великих деталей із вуглецевих та легованих сталей, чавуну, кольорових сплавів, тугоплавких і спеціальних сплавів.

Високочастотну електроіскрову обробку застосовують для підвищення точності та зменшення шорсткості поверхонь, оброблених електроерозійним методом. Метод заснований на використанні електричних імпульсів малої потужності частотою 100 – 150 кГц.

Для електроіскрової обробки використовують імпульсні іскрові розряди між електродами, один з яких є оброблювана заготовка (анод), а інший – інструмент (катод). Заготовкою служить термоелектричний матеріал на основі  $Bi_2Te_3$ . Поверхня інструмента зазнає руйнування, тому дріт постійно протягується, тобто в зону ерозії увесь час надходить новий інструмент. Діапазон застосованих діаметрів інструмента-дроту перебуває в межах 0.03 мм – 0.1 мм. Матеріалом дроту служать латунь, молібден, вольфрам. Повторне використання інструмента-дроту, що брав участь в ерозії, не рекомендується тому, що діаметр повинен бути строго каліброваним. Охолоджуючи електроди, рідина стабілізує процес розрізання злитків термоелектричного матеріалу на диски (рис. 2).

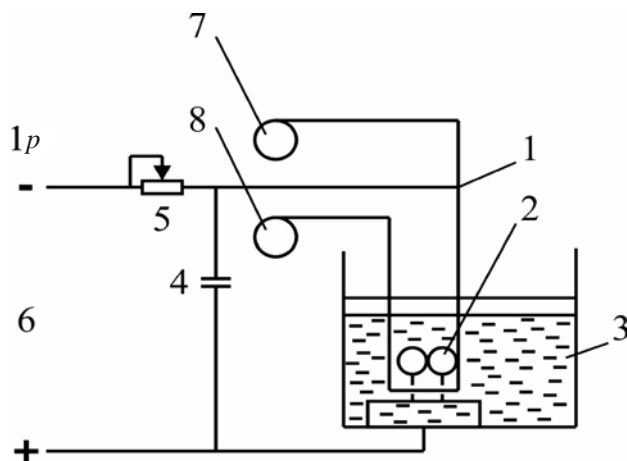


Рис. 2 Схема електроіскрової обробки ТЕМ:

- 1 – інструмент-дріт, 2 – злитки (ТЕМ), 3 – середовище в якому проводиться розряд,  
4 – конденсатор, 5 – реостат, 6 – джерело живлення, 7 – котушка з дротом,  
8 – котушка з відпрацьованим дротом, 1р – режим електроіскрової обробки.

Характерні риси цього процесу – порівняно низька продуктивність обробки, зношування електрода-дроту, застосування переважно релаксаційних, тобто залежних від стану міжелектродного проміжку схем генерування імпульсів – тривалістю 10 – 200 мкс за частоти 2 – 5 кГц, використання прямої полярності струму. На оброблюваній поверхні термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту, утворюються приповерхневі порушені шари глибиною 20 – 30 мкм, які знижують добротність віток. Тому обов'язковою операцією є видалення порушеного шару хімічним травленням.

Не слід забувати, що при електроерозійній обробці відбувається забруднення повітря робочої зони і, як наслідок, навколишнього середовища, шкідливими речовинами, що виділяються у процесі роботи. Такими речовинами є діоксид азоту, діоксид сірки, чадний газ, ксілол.

### Різання дротами із зв'язаним абразивом

Метод різання дротами із зв'язаним абразивом дає можливість розрізати злитки ТЕМ на основі  $Bi_2Te_3$  на диски, а диски на вітки  $n$ - і  $p$ -типів (рис. 3).



Рис. 3. Диски й гілки  $n$ -і  $p$ -типів.

Основа ріжучого інструменту – змінна рамка (рис. 4), завдяки своїй гнучкості, натяг дроту по всій площині здійснюється рівномірно. Крок намотування вольфрамового дроту задається пазами розмірних планок.

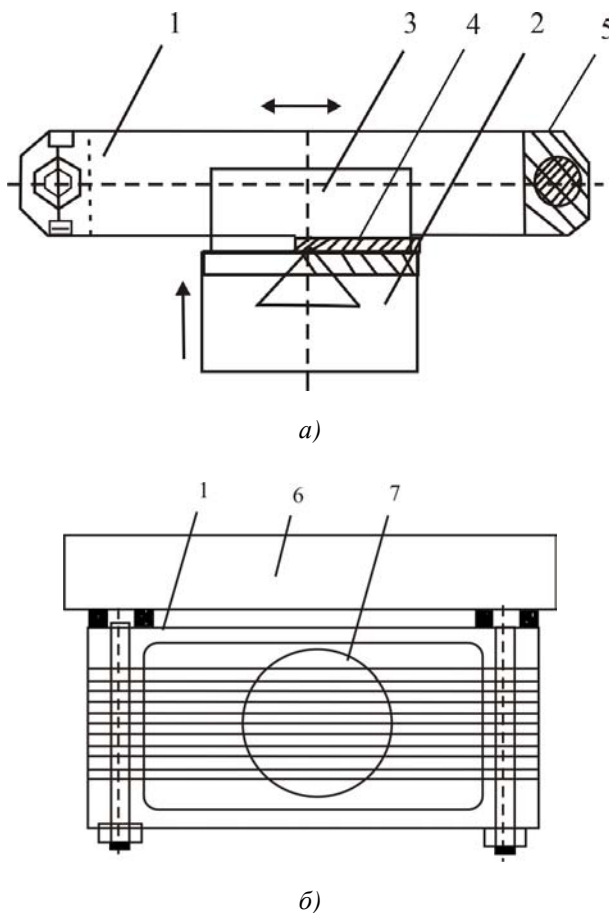


Рис. 4. Рамка з нанесеними алмазними зернами: 1 – рамка, 2 – столик, 3 – ТЕМ, 4 – прокладка, 5 – розмірні планки, 6 – каретка, 7 – дріт з нанесеними алмазними зернами.

Алмазний шар на дроті формується закріпленням синтетичних алмазних зерен розміром 40/28 гальванічним способом нанесення. Як метал-зв'язування застосовують нікель.

Основна перевага різання дротом, порівняно з електроіскровим методом – можливість одержати

розрізані диски й вітки *n*- і *p*-типів з порушеннями структури внаслідок малих термодинамічних напруг, що виникають у зоні контакту інструмента з термоелектричним матеріалом на глибині 10 – 25 мкм.

Швидкість розрізання – 1 мм/хв, а застосування ряду паралельно ріжучих дротів за одночасної роботи на 4-х вузлах верстата Алтек-13005М (рис. 5) збільшує продуктивність такого способу розрізання.

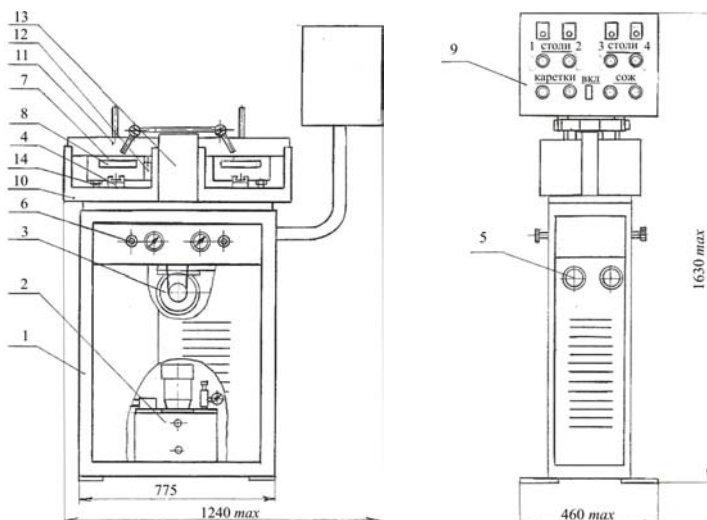


Рис. 5 Верстат струнного різання Алтек – 13005М.

- 1 – станина, 2 – гідростанція, 3 – головний привод, 4 – столи з гідроприводами, 5 – мотори сервоприводів підйому – опускання столів, 6 – регулятори тиску подачі столів, 7 – каретка з гідростатичними напрямними, 8 – ріжуча рамка з нанесеними алмазами, 9 – пульт керування, 10 – піддон, 11 – ліва кришка, 12 – захисний косинець лівого піддону, 13 – кожух, 14 – мікрогвинти установки глибини розрізування.

За 8 годин роботи верстата при розрізанні дисків термоелектричного матеріалу *n*- і *p*-типів діаметром 24.0 мм і товщиною 1.5 мм можна одержати не менше 210000 шт. напівелементів розміром  $1.4 \times 1.4 \text{ мм}^2$ .

Контрольні розрізи показали, який відсоток відходів одержуємо в порошкоподібному вигляді у процесі розрізування дисків термоелектричного матеріалу  $\varnothing 24.0$  мм і товщиною 1.5 мм на вітки *n*- і *p*-типів, а після промивання й розбраковування у твердому стані.

Таблиця

Розмір віток	1.0×1.0×1.5 мм
Кількість дисків 1 шт.	вага 5 г.
Кількість різів	19
Придатних віток 283 шт.	вага 3.02 г. 60.4%
Загальна кількість відходів	вага 1.98 г. 39.6%
Відходи у твердому вигляді	вага 0.34 г. 6.8%
Відходи у порошковому вигляді	вага 1.64 г. 32.8%
Розмір віток	1.4×1.4×1.5 мм
Кількість дисків 1 шт.	вага 5 г.
Кількість різів	14
Придатних віток 143 шт.	вага 3.23 г. 64.6%
Загальна кількість відходів	вага 1.77 г. 35.4%
Відходи у твердому вигляді	вага 0.47 г. 9.4%
Відходи у порошковому вигляді	вага 1.3 г. 26%

У порошкоподібному стані відсоток відходів вищий, а по завершенні 8 – годинної роботи верстата струнного різання Алтек-13005М вони збираються в бак для відходів, змішуючись в одну масу, а розділити термоелектричний матеріал *n*- і *p* після просушки досить важко.

На верстаті Алтек-13005М застосований спосіб роздільного збору відходів *n*- і *p*-типів, які накопичуються за розмірної обробки термоелектричного матеріалу на основі  $Bi_2Te_3$ .

## Висновки

1. Перевага методу розрізання дротом зі зв'язаним абразивом порівняно з електроерозійним, за розмірної обробки сплавів на основі телурида вісмуту на верстатах струнного різання Алтек-13005М – висока продуктивність, мінімальна глибина порушеного шару, менше споживання електроенергії на одиницю продукції, низька вартість процесу обробки.
2. Застосовано спосіб роздільного збору відходів *n*- і *p*-типів термоелектричного матеріалу на основі  $Bi_2Te_3$  у процесі різання.
3. Екологічна безпека обробки, оскільки під час роботи (на відміну від електроіскрового методу) у навколишнє середовище не потрапляють пари напівпровідникового матеріалу.

## Література

1. Готра З.Ю. Справочник по технологии микроэлектронных устройств. – Львов: Каменяр, 1986. – 287 с.
2. Гольцман Б.М., Кудинов В.А., Смирнов И.А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе  $Bi_2Te_3$  М. Наука, 1972. – 320с.
3. Станок для резки полупроводниковых материалов Алтек – 13005М. Рекламный проспект.

Надійшла до редакції 12.08.2015