

УДК 67.02



Запаров С.Ф.

Запаров С.Ф.

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

ЗАСОБИ ОБРОБКИ ТЕМ ТА ЇХ ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

У роботі досліджено різні методи роздільної обробки термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 . Проведено порівняльний аналіз способів обробки з урахуванням глибини порушених поверхневих шарів термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту. Визначено переваги й недоліки технологічних режимів під час обробки ТЕМ.

Ключові слова: методи обробки ТЕМ, порівняльний аналіз.

This paper studies different methods for dimensional processing of thermoelectric materials based on Bi_2Te_3 . A comparative analysis of processing tools has been made with regard to the depth of damaged surface layers of thermoelectric materials based on bismuth telluride. The benefits and drawbacks of operating practices while processing thermoelectric materials (TEM) have been determined.

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

Вступ

Термоелектричні модулі охолодження, генераторні модулі містять вітки з напівпровідникових термоелектричних матеріалів (ТЕМ) на основі Bi_2Te_3 . Ці матеріали в більшості випадків одержують методами вертикальної зонної плавки, Бріджмена або Чохральського. Широко також застосовується метод екструзії.

Здебільшого отримані зазначеними методами термоелектричні матеріали мають циліндричну форму у вигляді зразків діаметром від 10 до 30 мм за довжини від 50 до 400 мм. Із цих зразків необхідно виготовити вітки n - і p - типів у вигляді прямокутних паралелепіпедів, розмір граней яких – в інтервалі від декількох десятків долей міліметра до декількох міліметрів.

Для виготовлення віток необхідно виконати розмірну обробку зразків термоелектричного матеріалу. Основною вимогою до процесу розмірної обробки є збереження термоелектричної добротності ТЕМ. Важливою також, є вартість і продуктивність розмірної обробки.

Ця стаття присвячена зіставному аналізу наявних методів і засобів розмірної обробки ТЕМ на основі Bi_2Te_3 .

Методи розмірної обробки матеріалів

Методи розмірної обробки матеріалів можна поділити на наступні основні групи:
- електронно-променева,

- світло-променева (лазерна),
- електроерозійна,
- електрохімічна,
- механічна.

Електронно – променеві й лазерні методи розмірної обробки напівпровідникових матеріалів широко використовуються в мікроелектроніці. Однак вони не застосовуються для розмірної обробки матеріалів на основі Bi_2Te_3 , оскільки високі щільності енергії за взаємодії з телуридом вісмуту призводять до підплавлення приповерхневих шарів та істотного зниження добротності.

Електроерозійні методи обробки засновані на законах ерозії (руйнування) електродів із струмопровідних матеріалів при пропусканні між ними імпульсного електричного струму. До цих методів відносять електроіскрову, електроімпульсну, високочастотні: електроіскрову, електроімпульсну й електроконтактну обробки.

Для електроіскрової обробки використовують імпульсні іскрові розряди між електродами, один з яких є оброблювана заготовка (анод), а інший - інструмент (катод).

Для електроімпульсної обробки використовують електричні імпульси великої тривалості (500-10000 мкс), у результаті чого відбувається дуговий розряд. Електроімпульсну обробку доцільно застосовувати при попередній обробці. Точність розмірів і шорсткість оброблених поверхонь залежать від режиму обробки.

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.

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 (ЕКО) оплавленням рекомендують для великих деталей.

Для розмірної обробки ТЕМ в основному застосовують електроіскровий метод (рис. 1).

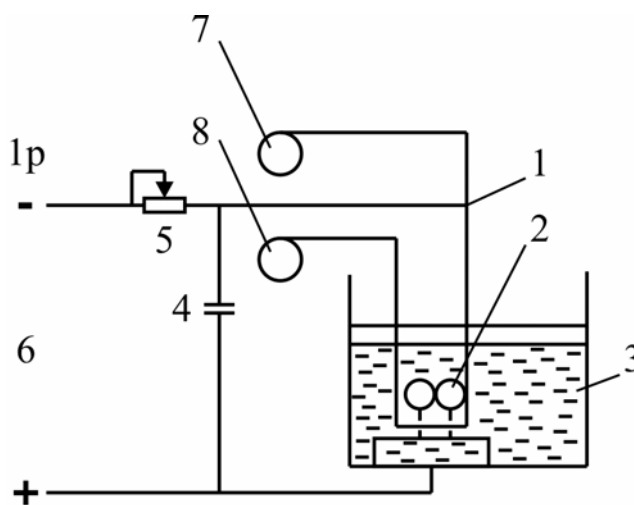


Рис. 1 Схема електроіскрової обробки ТЕМ:

- 1 - інструмент-дріт, 2 - зливки (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.

З наближенням двох електродів 1 і 2 та підключенням до них напруги, достатньої для пробою міжелектричного проміжку, що утворився, виникає електричний розряд у вигляді вузького провідного стовпа з температурою, вимірюваною десятками тисяч градусів. В основі цього стовпа спостерігається руйнування (оплавлення, випар) матеріалу електродів. Електродом-інструментом є латунний, вольфрамовий або молібденовий дріт діаметром 0.05 - 0.3 мм, що безупинно переміщується. Обробку здійснюють у середовищі робочої рідини, якою є вода. Рідке середовище забезпечує виникнення динамічних сил, необхідних для видалення матеріалу, що руйнується. Охолоджуючи електроди, рідина стабілізує процес розрізання.

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

Електрохімічна розмірна обробка характеризується великою енергоємністю процесу, для ефективного розрізування телуриду вісмуту потрібне застосування спеціального електроліту. Тому для масового виробництва віток ТЕМ цей метод не використовується.

Механічна розмірна обробка термоелектричних матеріалів має свої особливості. Оскільки телурид вісмуту характеризується низькою механічною міцністю та крихкістю, звичайні механічні методи розмірної обробки неприйнятні. Практично єдиним методом, що застосовується для механічної обробки термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 , є обробка із застосуванням зв'язаних або вільних абразивів.

Для різання термоелектричного матеріалу використовують сталеві полотна, диски, металеві струни, де застосовують абразивний порошок (вільний абразив) або з нанесеними на них алмазними зернами (зв'язаний абразив).

Абразивним може бути будь-який природний або штучний матеріал, зерна якого мають певні властивості: твердість, абразивну здатність, механічну стійкість. Головна особливість абразивних матеріалів – їх висока твердість порівняно з іншими матеріалами, на чому побудовані всі процеси механічної обробки.

Під твердістю розуміють здатність абразивного матеріалу чинити опір вдавненню в нього іншого матеріалу, що не отримує залишкових деформацій.

Під абразивною здатністю – можливість за допомогою одного матеріалу обробляти інший або групу різних матеріалів.

Під механічною стійкістю – здатність абразивного матеріалу витримувати механічні навантаження й не руйнуватися під час механічної обробки.

Алмаз – найтвердіший з відомих матеріалів. Його мікротвердість рівна $9.8 \cdot 10^{10}$ Н/м². У промисловості використовуються в основному штучні алмази, які одержують із графіту, обробленого під великим тиском і за високої температури.

Різання сталевими полотнами або наборами полотен з використанням абразивної суспензії показано на (рис. 2).

У зону різання подають абразивну суспензію, яка, прискорюючись за рахунок руху полотен, із силою вдаряє в оброблюваний матеріал і відколює від нього мікрочастинки. Процес різання прискорюють частки абразиву, поступово оновлювані в зазорі між сталевими

полотнами й термоелектричним матеріалом. Абразивна суспензія досить добре відводить тепло із зони різання й спеціального охолодження не вимагає.

Метод не забезпечує високої продуктивності і якості внаслідок нерівномірності натягу полотен в обоймі, їх вібрації, нерівномірності зношування.

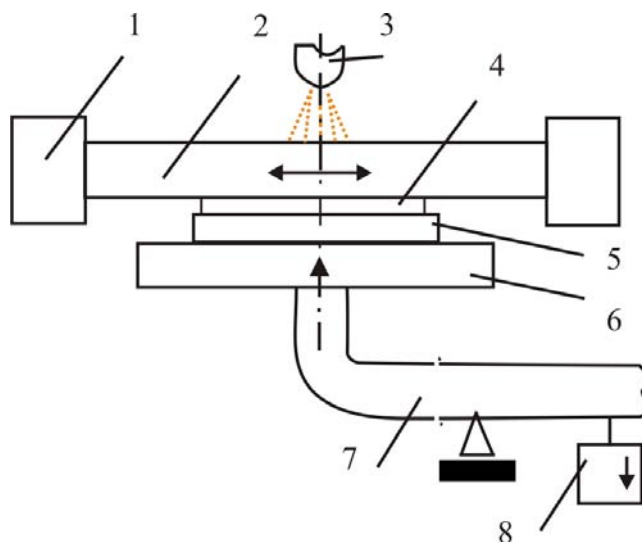


Рис. 2. Різання сталевими полотнами:

1 – обойма, 2 – сталеве полотно, 3 – сопло подачі суспензії,
4 – матеріал, що розрізається, 5 – прокладка, 6 – столик, 7 – важіль, 8 – вантаж.

Дротова пилка являє собою дріт товщиною 0.08 – 0.15мм. Різання здійснюється набором дротових пилок (рис. 3) з використанням вільного абразиву.

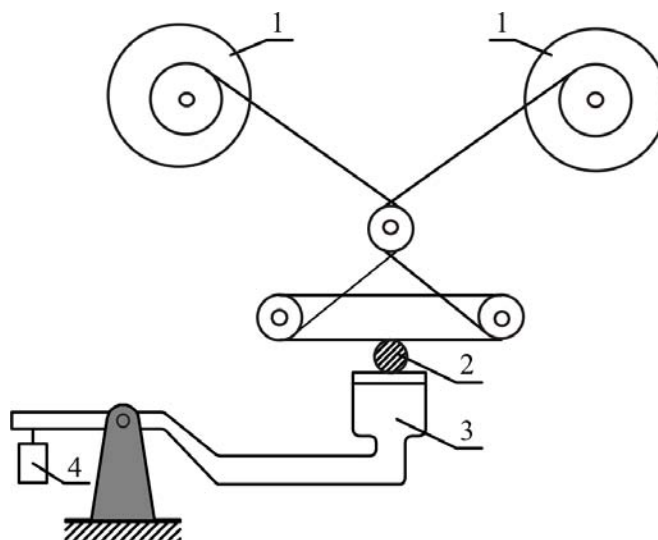


Рис. 3. Різання дротом:

1 – дріт, 2 – матеріал, 3 – важіль, 4 – вантаж.

Дротова пилка дає можливість виконувати одночасно розрізування заготовки на велику кількість дисків, при цьому за рахунок товщини пластин, що відрізаються, і ширини пропилю досягається більша економія оброблюваних матеріалів. Але основна перевага дротового різання

полягає в тому, що цей метод дає можливість одержати оброблені зразки з мінімальними порушеннями структури кристала через малі термодинамічні напруги, що виникають у зоні контакту інструмента з оброблюваним матеріалом. Однак цьому методу властиві й обмеження, які не дають широко й ефективно використовувати дротовий інструмент для операції різання великих кристалів. До них, у першу чергу, належить мала стійкість дроту, причому опірність дроту у всіх напрямках однакова, що значною мірою позначається на макропрофілі оброблюваних поверхонь. Цей метод малопродуктивний, і вартість його досить велика, тому розглянутий спосіб застосовується лише для різання на невелику глибину, де ефективність не відіграє великої ролі.

Різання диском із зовнішньою алмазною кромкою порівняно із процесом різання полотнами або дротом із застосуванням абразивної суспензії має вищу продуктивність. Схему процесу зображено на рис. 4.

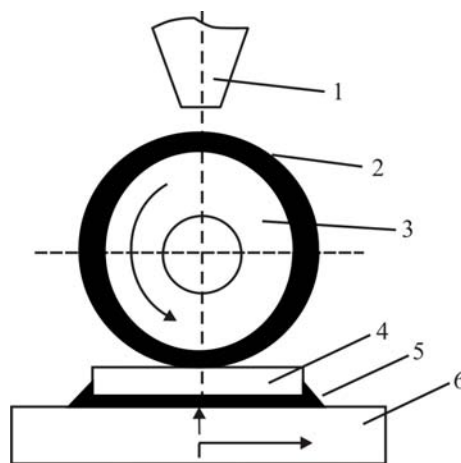


Рис. 4. Різання алмазним диском із зовнішньою ріжучою кромкою:
1 – сопло подачі охолодження рідини, 2 – ріжуча кромка диска, 3 – основа диска,
4 – матеріал, що розрізається, 5 – матеріал, що зклеює,
6 – підложка.

Алмазозносний ріжучий шар на металевий диск наноситься за допомогою спеціального зв'язування. Із усіх видів зв'язувань (органічне, керамічне, металеве) тільки металеве зв'язування повністю забезпечує зчеплення алмазо-утримуючого шару з металевим диском. Диск закріплюється на шпинделі верстата своєю центральною частиною. Таке закріплення не забезпечує високої жорсткості диска. Ріжуча кромка виступає за зовнішній діаметр притискних фланців не більше ніж на 1.5 мм від глибини різання. У процесі різання диск не повинен вібрувати і відхилятися від площини, досягти чого досить важко.

Способом різання алмазним диском із внутрішньою ріжучою кромкою (рис. 5) можна виконувати різання зливків на диски, дисків на окремі кристали. Основою диска служить сталева фольга товщиною 0.1, 0.2 мм, на внутрішню кромку якої наноситься абразив гальванічним методом, що описаний вище.

До переваг різання належить висока швидкість різання, висока якість обробки поверхні, малий розкид по товщині, невеликі відходи матеріалу. Однак зі збільшенням частоти обертання диска понад 5000 об/хв виникає вібрація верстата та підвищення температури в зоні різання. До

недоліків різання можна віднести складність встановлення алмазного диска, його натяг і центрування, тобто залежність якості й точності обробки від точності і якості інструмента.

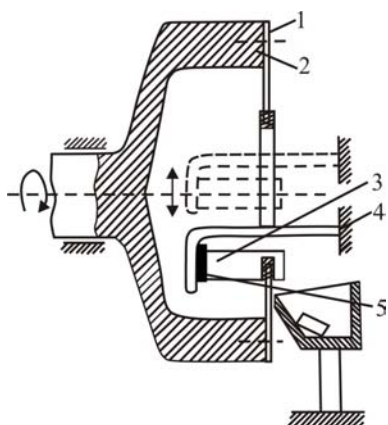


Рис. 5. Різання алмазним диском із внутрішньою ріжучою кромкою:
1 – коло АКВР, 2 – барабан, 3 – злиток, 4 – оправлення, 5 – мастика, що зклеює.

Принцип різання струнами з нанесеними алмазами зернами практично такий же, що й при різанні алмазними дисками, але завдяки своїй гнучкості натяг струн по всій площині інструмента здійснюється рівномірно (рис. 6). Струни з вольфраму розміщуються на змінній рамці, яка є різальним інструментом. Відстань між струнами задається розмірними планками.

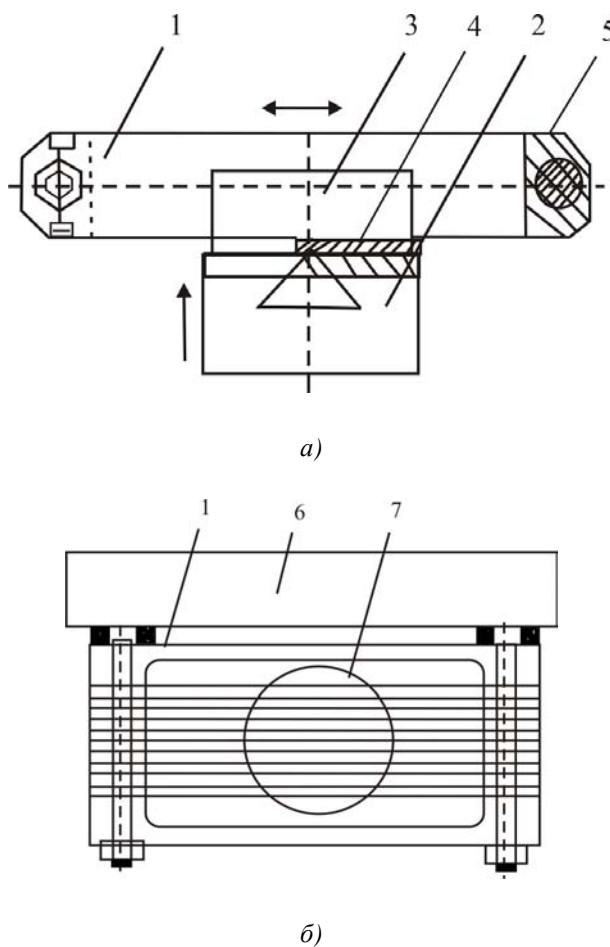


Рис. 6. Рамка з нанесеними алмазними зернами:
1 – рамка, 2 – столик, 3 – ТЕМ, 4 – прокладка, 5 – розмірні планки (а),
6 – каретка, 7 – струни з нанесеними алмазними зернами (б).

За перелічених методів обробки (табл. 1) порушені приповерхні шари мають знижені механічні властивості, у результаті чого міцність зчеплення ТЕМ знижена, що знижує механічну міцність.

Порівняльний аналіз різних типів устаткування для різання матеріалів на основі Bi_2Te_3 показав, що більш прийнятним є розрізування струнами із застосуванням вільного абразиву, однак швидкість розрізування в цьому випадку досить низька ($0.1 \div 0.3$ мм/хв), що робить таку технологію безперспективною.

Таблиця 1

Залежність товщини порушеного шару від методу обробки

Метод розрізування	Товщина порушеного шару, мкм
Струнне різання вільним абразивом	5 ÷ 15
Струнне різання із закріпленими алмазними зернами	10 ÷ 25
Електроіскрове різання	20 ÷ 30
Різнання алмазним диском із внутрішньою ріжучою кромкою	30 ÷ 50
Різнання алмазним диском із зовнішньою ріжучою кромкою	50 ÷ 65

Значно продуктивніше відбувається розрізування струнами із закріпленими алмазними зернами. Швидкість при цьому зростає до 1 мм/хв, причому застосування кількох паралельних одночасно ріжучих струн збільшує продуктивність такого способу різання.

Електроіскрове розрізування через збільшену товщину порушеного шару й невисокої продуктивності менш привабливий.

Використання алмазного диска із внутрішньою й зовнішньою ріжучою кромкою – найгірший спосіб, який в остаточному підсумку призводить до зниження якості термоелектричного матеріалу.

Таким чином, у промисловому виробництві в разі масового виготовлення термоелектричних модулів охолодження, генераторів найбільш перспективним є метод розрізування струнами із закріпленими алмазними зернами з використанням верстатів Алтек – 13005М (рис. 7).



Рис. 7. Верстат Алтек – 13005М.

Висока швидкість руху різального інструмента забезпечується застосуванням гідростатичних направляючих з рідинним тертям, висока продуктивність – одночасним розрізуванням заготовок на 4-х робочих столах зі швидкістю $0.4 \div 0.8$ мм/хв, що робить використовувати його для масового виробництва термоелектричних модулів.

Таблиця 2

Основні технічні дані й характеристики верстата Алтек – 13005М

1	Максимальні розміри заготовок, що розрізуються, мм	50×50×14
2	Число струн $\varnothing 0.14$ на рамці максимальне, шт.	1
3	Мінімальна ширина розрізу, мм	119
4	Кількість робочих столів, шт.	0.22
5	Хід робочого стола мм	4
6	Привід подачі робочого стола	не менше 25
7	Робочий тиск у приводі подачі робочого стола, МПа	гідравлічний
8	Частота руху різучих кареток, подвійних ходів у хв	0.24-0.35
9	Хід кареток, мм	до 1400
10	Вага, кг	36 ± 0.5
11	Споживана електрична потужність (без станції оборотного водопостачання), кВт	не більше 150
12	Напруга живлення частотою 50 Гц, В	0.7
13	Габарити, мм	380
14	Число струн $\varnothing 0.14$ на рамці максимальне, шт.	1700×1200×500

210 000 віток розміром 1.4×1.4×1.5мм можуть бути отримані з матеріалів Bi_2Te_3 упродовж 8 годин.

Точність розрізування віток розміром 1.4×1.4мм становить ± 0.02 мм. Розподіл відхилення від заданого розміру наведено на (рис. 8).

Для роботи в лабораторних умовах доцільно використовувати малогабаритний настільний верстат Алтек – 13009, де продуктивність не відіграє великої ролі і є можливість використовувати два методи розрізування – вільним і зв'язаним абразивом (рис. 8).

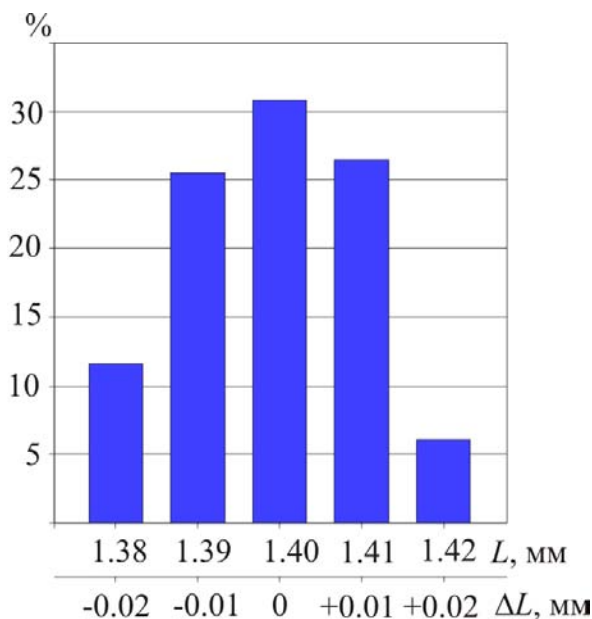


Рис. 8. Розподіл відхилення розміру віток.

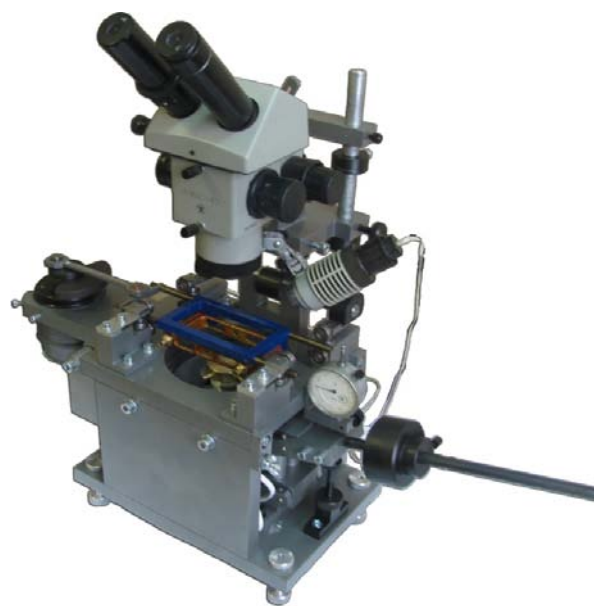


Рис. 9. Малогабаритний настільний верстат Алтек – 13009.

Підшипникове ковзання направляючих каретки забезпечує точність і легкість їх зворотно-поступального руху.

Таблиця 3

Основні технічні дані й характеристики верстата Алтек – 13009

1	Максимальні розміри заготовки для розрізування, мм	40×40×15
2	Число струн $\varnothing 0.14$ на рамці мінімальне, шт.	1
3	Число струн $\varnothing 0.14$ на рамці максимальне, шт.	95
4	Ширина розрізу з алмазним покриттям, мм	0.22
5	Ширина розрізу з вільним абразивом, мм	0.15
6	Вага, кг	не більше 30
7	Споживана електрична потужність, Вт	60
8	Блок живлення, В	14
9	Габарити, мм	340×690×630

Малогабаритний настільний верстат зручний в експлуатації, економічний за споживанням електроенергії, не вимагає великих матеріальних витрат.

Висновки

Спеціально розроблені для розрізування термоелектричних матеріалів верстати струнного різання є оптимальним засобом обробки сплавів на основі телуриду вісмуту. Вони забезпечують високу продуктивність, необхідну точність розрізування, мінімальну глибину порушеного шару, низьку вартість процесу розрізання.

Література

1. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. – / Л.И. Анатичук // Киев: Наук. думка, 1979г. – 768 с.
2. Камнев А.Б. Механическая обработка полупроводниковых материалов. / А.Б. Камнев, Б.А. Лапшинов // М. 1990.
3. Німчук В.В. Високопродуктивний верстат для різання термоелектричних матеріалів / В.В. Німчук, С.Ф. Запаров, А.В. Сатиго // Термоелектрика. – 2008. – № 1. – С. 54-60.
4. Станок для резки полупроводниковых материалов Алтек 13005 М. Рекламный проспект.

Надійшла до редакції 17.07.2014