

УДК 621.791.4

**О.О. Новомлинець**, канд. техн. наук**І.В. Завальна**, аспірант

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

**Є.В. Половецький**, канд. техн. наук

Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, м. Київ, Україна

### ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ У ПРОЦЕСІ ВИГОТОВЛЕННЯ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

**О.А. Новомлинец**, канд. техн. наук**И.В. Завальная**, аспирант

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

**Е.В. Половецкий**, канд. техн. наук

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, г. Киев, Украина

### ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

**Oleh Novomlynets**, PhD in Technical Sciences**Iryna Zavalna**, PhD student

Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

**Yevhen Polovetskyi**, PhD in Technical Sciences

Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

### THE FEATURES OF PRODUCTION OF PERMANENT CONNECTIONS FOR MAKING THERMOELEMENTS

*Наведено короткий літературний огляд особливостей отримання нероз'ємних з'єднань при виготовленні термоелементів. Проаналізовано тенденції розвитку та сфери використання термоелементів. Розглядаються способи комутації віток термоелементів, їх переваги та недоліки. Наведені основні вимоги до матеріалів віток термоелементів. Проаналізовано вимоги щодо отримання якісних нероз'ємних з'єднань. Розглянуто питання підбору режиму паяння термоелементів, як одного з найпоширеніших способів комутації віток термоелементів. Наведено коротку характеристику телуриду вісмуту, як традиційного напівпровідникового матеріалу для виготовлення термоелементів. Встановлено задачі щодо подальшого розроблення перспективного способу отримання нероз'ємного з'єднання напівпровідникового матеріалу  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  з комутуючою мідною пластинкою.*

**Ключові слова:** термоелемент, комутація, телурид вісмуту, мідь.

*Приведен краткий литературный обзор особенностей получения неразъемных соединений при изготовлении термоэлементов. Проанализированы тенденции развития и области использования термоэлементов. Рассматриваются способы коммутации веток термоэлементов, их преимущества и недостатки. Приведены основные требования к материалам веток термоэлементов. Проанализированы требования относительно получения качественных неразъемных соединений. Рассмотрены вопросы подбора режима паяния термоэлементов, как одного из самых распространенных способов коммутации веток термоэлементов. Приведена краткая характеристика теллурида висмута, как традиционного полупроводникового материала для изготовления термоэлементов. Установлены задачи относительно дальнейшей разработки перспективного способа получения неразъемного соединения полупроводникового материала  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  с коммутирующей медной пластиной.*

**Ключевые слова:** термоэлемент, коммутация, теллурид висмута, медь.

*The short literary review of the features of production of permanent connections for making thermoelements is provided. Tendencies of development and area of use of thermoelements are analysed. The ways of switching of branches of thermoelements, their advantages and shortcomings are considered. The main requirements to materials of branches of thermoelements are provided. The requirements concerning receiving high-quality permanent connections are analysed. The questions of selection of a mode of soldering of thermoelements, as one of the most widespread ways of switching of branches of thermoelements are considered. The short characteristic of bismuth telluride, as traditional semiconductor material for production of thermoelements is provided. The tasks, rather further development of a perspective way of receiving of permanent connection of the semiconductor material  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  with a switching copper plate are established.*

**Key words:** thermoelement, switching, bismuth telluride, copper.

**Постановка проблеми.** В умовах стрімкого зростання світового споживання енергії, що призводить до скорочення запасів природного палива, неминуче виникає проблема пошуку альтернативних джерел енергії. Одним із перспективних варіантів є термоелектричні перетворювачі, які працюють на основі взаємоперетворення теплової і електричної енергії.

Масове впровадження термоелектриків може вирішити проблему перетворення паразитного тепла, що виділяється під час роботи машин, в електроенергію. Наприклад, перетворення тепла від двигуна внутрішнього згорання автомобіля в електричний струм приведе до істотної економії палива (за розрахунками до 25 %). Термоелектрики також можуть бути затребувані у виробництві ефективних охолоджувачів. У порівнянні з традиційними компресорними холодильними установками термоелектрики надзвичайно компактні і не містять рухливих частин, що забезпечує їх високу надійність (термін служби до 200 000 год, тобто близько 25 років). Крім того, компактні термоелектричні охолоджувачі можуть бути інтегровані у пристрої, що вимагають локального охолодження однієї або декількох частин [1].

Очікується, що вже в найближчому майбутньому ефективність термоелектричних матеріалів виявиться достатньою для витіснення компресорних холодильних агрегатів термоелектричними. Очевидна й інша перевага термоелектриків – їх екологічна привабливість, оскільки вони не містять шкідливих хімічних сполук [1].

Слід зазначити, що є сфери, де термоелектрика є необхідною та незамінною. Такі перетворювачі використовуються як джерела електрики на космічних апаратах, застосовуються в портативних холодильних агрегатах, в електронному, медичному й науковому устаткуванні, зокрема для охолодження інфрачервоних приймачів і оптоелектронних обладнань, для отримання корисної енергії за рахунок відпрацьованих газів в автомобілях. Однак для нових та економічно вигідних промислових застосувань термоелектричних перетворювачів енергії необхідно істотне підвищення їх ефективності [2].

Враховуючи широке застосування термоелектричних перетворювачів у багатьох галузях промисловості, питання отримання нероз'ємних з'єднань під час виготовлення термоелементів є актуальним. Так, наприклад, відомо, що у 2012 році доктор Сеунг Кім разом з доктором Йоні Адоній інженерної школи університету Ле Турно отримали грант у розмірі \$129,000 на проведення досліджень та розроблення мікрохвильової технології зварювання телуриду вісмуту з міддю, через Ni та Al порошкові прошарки, для виготовлення термоелектричних генераторів [3; 4].

На сьогодні є різні методи комутації термоелементів: пайка, спільне пресування термоелектричних віток і комутаційного матеріалу, напилення комутаційних матеріалів у вакуумі або інертному газі, гальванічне або хімічне нанесення комутаційного матеріалу, контактне електрозварювання та мікрохвильове зварювання через порошкові прошарки. Однак всі ці способи мають недоліки і не можуть повною мірою задовольнити вимоги до якості нероз'ємних з'єднань напівпровідникового матеріалу з комутуючою пластиною.

Тому головною метою цієї роботи є літературний огляд щодо особливостей отримання нероз'ємних з'єднань під час виготовлення термоелементів та визначення напряму проведення подальших досліджень щодо розроблення нової технології зварювання напівпровідникового матеріалу з комутуючою пластиною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Термоелектрика – це прогресуючий, пріоритетний науково-технічний напрямок, в основі якого лежать дослідження явищ термоелектричного перетворення енергії та їх використання для створення джерел електричної енергії, приладів охолодження та вимірювальної техніки [5].

Термоелемент – електричний ланцюг, складений з двох або декількох провідників (напівпровідників), що чергуються (рис. 1). Якщо місця з'єднань провідників підтримувати при різних температурах, то на кінцях ланцюга виникає електрорушійна сила (Е.Р.С.), а при замиканні ланцюга в ній протікає електричний струм і навпаки – при пропусканні по ланцюгу електричного струму одні її контакти нагріватимуться, а інші – будуть охолоджуватися.

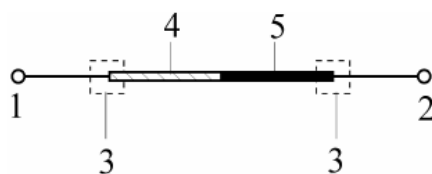


Рис. 1. Модель термоперетворювача безпосереднього нагріву:  
1, 2 – електричні виводи, 3 – термостат, 4, 5 – вітки термопар

Основу термоелектричних явищ складають три важливі ефекти: Зеебека, Пельтьє та Томсона.

Ефект Зеебека, що полягає у виникненні напруги у колі, що складається із двох різноорідних металічних провідників, які підтримуються при різних температурах (рис. 2), математично можна записати у вигляді:

$$E_{AB} = S_{AB} \cdot \Delta T, \tag{1}$$

де  $E_{AB}$  – напруга в ефекті Зеебека;

$S_{AB}$  – коефіцієнт термо-Е.Р.С (коефіцієнт Зеебека);

$\Delta T$  – градієнт температури.

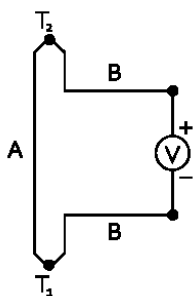


Рис. 2. Принципова схема ефекту Зеебека [2]

Вироблена напруга в ефекті Зеебека є пропорційною до різниці температур між двома переходами.

Суть ефекту Пельтьє полягає в тому, що при проходженні струму на межах двох різних провідників на одному кінці відбувається поглинання тепла, а на іншому – його виділення.

Ефект Пельтьє значно сильніше проявляється на спаях різних типів напівпровідників. Залежно від напрямку протікання електричного струму через р-п-переходи внаслідок взаємодії електронів (n) і дірок (p), а також їх рекомбінацію, енергія або поглинається, або виділяється, у зв'язку з чим поглинається або виділяється тепло. Системи напівпровідникових пар р- та n-типу дозволяють створювати охолоджуючі елементи – термоелектричні модулі Пельтьє достатньо великої потужності.

Ефект Томсона полягає в перенесенні теплоти струмом, що протікає через однорідний матеріал, в якому створений градієнт температури. Якщо прикласти градієнт температури, причому напрям струму відповідатиме руху електронів від гарячого кінця до холодного, то під час переходу від більш гарячого перерізу до більш холодного (рис. 3), електрони передають надлишкову енергію оточуючим атомам (виділяється теплота), а у зворотному напрямку струму, рухаючись від більш холодної ділянки до більш гарячої, вони поповнюють свою енергію за рахунок оточуючих атомів (теплота поглинається матеріалом) [6].

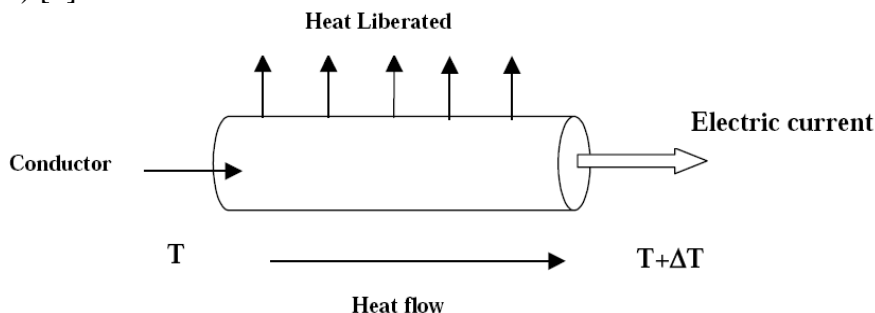


Рис. 3. Схема дослідів, який демонструє ефект Томсона [6]

Кількість теплоти, яка виділяється або поглинається, можна визначити через співвідношення [7]:

$$dQ = \sigma I \frac{dT}{dx} dx, \quad (2)$$

де  $dQ$  – кількість теплоти, яка виділяється або поглинається на ділянці провідника  $dx$ ;

$I$  – сила струму;

$T$  – температура;

$\sigma$  – коефіцієнт Томсона.

У сучасній теорії термоелектрики використовують поняття «добротність» ZT. «Добротність» ZT вказує, що добрі термоелектричні матеріали повинні мати високе значення коефіцієнта Зеебека, високу електропровідність (для зменшення нагрівання Джоуля через електричний опір) та низьку теплопровідність (для зведення до мінімуму втрат тепла).

Одним із перспективних напрямків підвищення ефективності термоелектричного перетворення енергії є використання нових підходів, заснованих на висновках, що слідують із узагальненої теорії термоелектрики з використанням сформульованого Л.І. Анатинчуком закону термоелектричної індукції [8]. Наслідком цієї теорії стала повна класифікація всіх видів термоелектричного перетворення енергії, яку вдалося звести у єдину таблицю, за аналогією до Періодичної таблиці хімічних елементів. Така класифікація дала можливість прогнозувати нові варіанти термоелектричних перетворювачів та здійснити системний підхід у процесі планування досліджень у термоелектриці. Відповідно до узагальненої теорії були розроблені методи відкриття принципово нових типів термоелементів, які базуються на індукції термоелектричного струму. Таким чином, було знайдено більше 20 нових типів термоелементів, запатентованих у США, Японії, Англії, Франції тощо. Суттєво розширилася сфера застосування термоелектрики [9].

З відкриттям нових матеріалів, що володіють вищими «коефіцієнтами добротності» ZT (наприклад,  $ZT > 1$ ), відкрилися нові можливості застосування термоелектричних технологій. Про це свідчить величезний інтерес до термоелектричних матеріалів у тематичних публікаціях (рис. 4) [10].

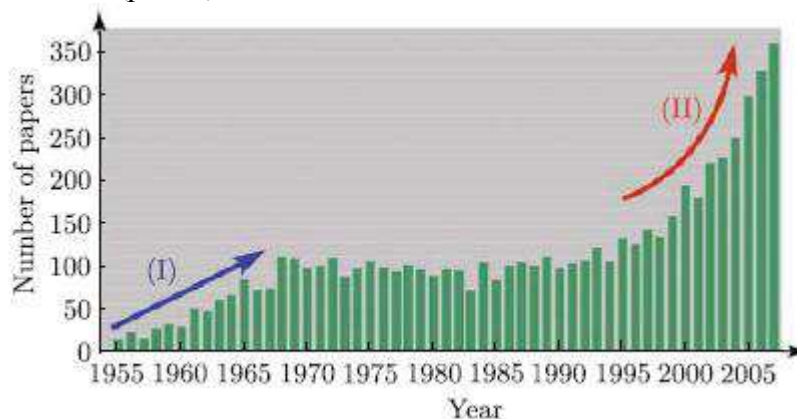


Рис. 4. Ріст кількості публікацій, які відносяться до термоелектрики у період з 1955 р. по 2007 р. [10]

На [5] наведено узагальнений перелік практичного використання термоелектричних перетворювачів (рис. 5):

- використання відпрацьованого тепла двигунів (автомобільних, корабельних та ін.);
- автономні джерела електроенергії для забезпечення роботи котельень, установок з перероблення відходів та ін.;
- джерела живлення для катодного захисту нафто- і газопроводів;
- перетворення тепла природних джерел (наприклад, геотермальних вод) в електричну енергію;

- забезпечення живлення різних пристроїв телеметрії та автоматики на об'єктах, віддалених від ліній електропередачі;
- вимірювання теплових потоків (теплоти);
- забезпечення автономним живленням малопотужних електронних пристроїв (бездротові датчики) за рахунок накопичуваної енергії, яка збирається за наявності мінімальних перепадів температур (менше 10°C);
- отримання електричної енергії на сонячних концентраторах за рахунок різниці температур гарячого і охолодженого теплоносія в контурі.

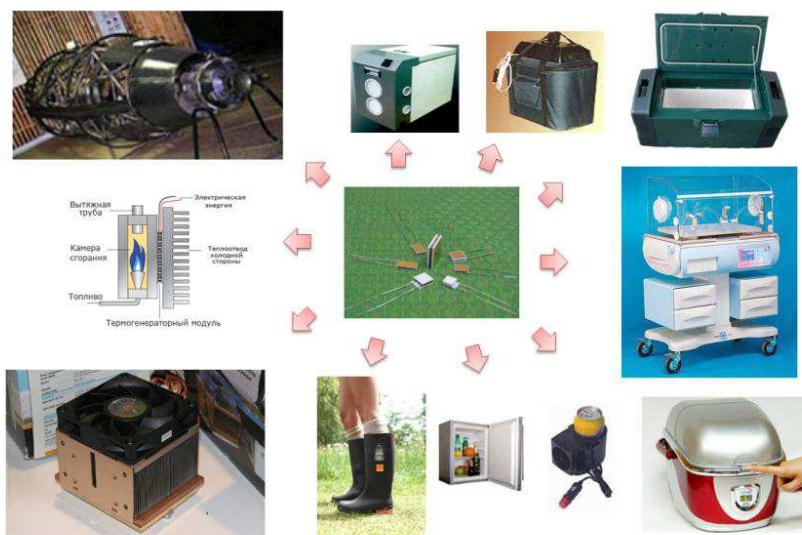


Рис. 5. Різноманітність сфер застосування термопарного елемента [11]

**Виклад основного матеріалу.** Комутація – складний технологічний процес, оскільки необхідно отримати нероз'ємні, сумісні за фізико-хімічними властивостями контактні з'єднання між гілками p- і n- типів провідності при мінімумі втрат на електро- і теплопереходах, при високій стабільності, достатній механічній міцності і стійкості до теплоперемінам (рис. 6).

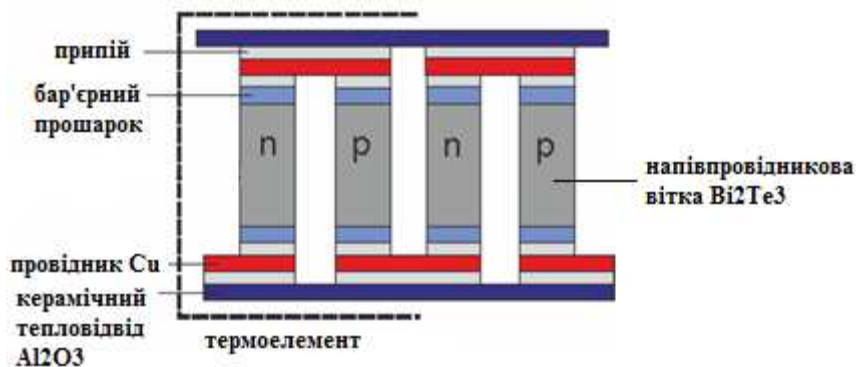


Рис. 6. Схема комутації віток термоелемента

Залежно від конструктивних особливостей модуля і режимів його роботи, втрати на контактних і комутаційних опорах можуть становити від декількох відсотків до декількох десятків відсотків від максимально можливих значень [12]. Тому для отримання якісних нероз'ємних з'єднань під час виготовлення термоелементів висувають такі вимоги:

- реальний розмір термоелемента повинен бути: шар провідника становить 10-1000 мкм; бар'єрний шар 1-100 мкм; шар припою 10-100 мкм; розмір напівпровідників, які використовуються у вітках термоелемента, знаходиться в діапазоні від 50×50×50 до 500×500×500 мкм [11];

- найпривабливішим для комутації віток є використання металів з високою тепло- і електропровідністю, наприклад, міді, срібла;

- використання мідної комутації вимагає нанесення на вітки модуля товстих антидифузійних шарів, наприклад, для зменшення дифузії міді в термоелектричний матеріал товщина антидифузійного шару Ni не повинна бути меншою, ніж 150-200 мкм, що призводить до збільшення внутрішніх напружень, які послаблюють адгезію Ni до термоелектричного матеріалу (дифузія міді у термоелектричний матеріал з тонкими антидифузійними шарами Ni, як і суттєве послаблення адгезії Ni до термоелектричного матеріалу з товстими антидифузійними шарами, є головними чинниками зменшення ресурсу роботи модулів з мідно-нікелевою комутацією).

Аналіз наявних експериментальних даних у сфері розроблення термоелектричних матеріалів свідчить про наступне [12]:

- основну частину термоелектричних матеріалів складають системи на основі Bi, Te, Se, Sb, Cd, вживані для створення генераторних і холодильних термоелектричних пристроїв;

- розвиток термоелектричних матеріалів йде шляхом розроблення багатокомпонентних систем з введенням великої кількості легуючих добавок;

- розроблення багатокомпонентних систем йде шляхом експериментального підбору компонентів, що входять у термоелектричні матеріали;

- дослідження властивостей термоелектричних матеріалів засноване на експериментальному визначенні характеристик розроблених складів, що породжує невиправдану кількість дрібних науково-дослідних робіт у вказаному напрямі.

Для вирішення питання про вибір складу матеріалу з необхідними властивостями для цілей термоелектричного перетворення енергії необхідно провести аналіз наявних нині термоелектричних властивостей матеріалів одно- і двокомпонентного складу і виявити їх закономірності і взаємозв'язки.

До термоелектричних матеріалів з погляду ефективності перетворення енергії і стабільності їх термоелектричних властивостей висуваються такі вимоги [12]:

- висока механічна й електрична міцність;

- слабка температурна залежність характеристик у робочому діапазоні температур;

- висока термоефективність;

- висока технологічність виготовлення матеріалів;

- висока хімічна стійкість;

- низька вартість напівпровідникових термоелектричних матеріалів тощо.

Як зазначають автори [13], одним з найефективніших традиційних термоелектричних матеріалів, використовуваних сьогодні для виготовлення робочих елементів термоелектричних приладів і обладнань, є телурид вісмуту  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Характерною рисою монокристала  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  є наявність площин спайності, по яких він легко розколюється, у силу чого його з достатнім ступенем точності можна вважати шаруватим. Крім того, монокристал  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  має досить добре виражену анізотропію теплопровідності й електропровідності. Теплопровідність цього кристала уздовж площин спайності в 2-3 рази перевищує його теплопровідність у напрямку, перпендикулярному цим площинам. Цілком аналогічно електропровідність  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  уздовж площин спайності для матеріалу р-типу в 2,7 раза більше, а для матеріалу n-типу – в 4-6 разів більше, ніж електропровідність у напрямку, перпендикулярному площинам спайності. Із цієї причини з метою максимізації термоелектричної добротності термоелектричні модулі з монокристалів виготовляються так, щоб електричний струм і градієнт температури були паралельні площинам спайності.

Є.П. Сабо у своїй роботі [14] зазначає, що термоелектричні прилади на основі  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  знайшли своє застосування в тих сферах техніки, в яких максимальні значення перетвореної енергії не перевищують 300-500 Вт (орієнтовно в діапазоні температур

80°C-250°C) або коли висуваються високі вимоги до довговічності, надійності і стійкості приладів до зовнішніх дій.

Л.І. Анатичук та ін. [15] зазначають, що з'єднання віток р- і n-типів в одне електричне коло, зазвичай, здійснюється металевими пластинами з міді, нікелю, заліза, кобальту, товщина яких залежить від сили струму. Вибір матеріалу комутації визначається відсутністю або мінімальною хімічною взаємодією його з напівпровідником і близькими коефіцієнтами лінійного розширення.

На сьогодні для комутації термоелементів найширше використовується метод паяння і спільного гарячого пресування [16-18]. Як припій використовують сплави Sn-Sb, Sn-Cu, Sn-Ag, Sn-Ag-Bi-Cu, Sn-Bi або Bi-Sb [11; 19]. Автором [20] було запропоновано режим паяння віток в термоелемент або ряд термоелементів:

- паяння віток n- або р-типів провідності в термоелемент або в ряд термоелементів проводять з використанням і того ж самого припою;

- при максимальному значенні робочої температури гарячого спаю (з'єднання, яке знаходиться в зоні нагріву) модуля до 120°C використовують багатокомпонентний припій, який містить від 10 до 52 мас. % Sn, від 15 до 48 мас. % In, від 0 до 10 мас. % Cd, від 0 до 10 мас. % Sb, решта – Pb;

- при максимальному значенні робочої температури гарячого спаю модуля до 290°C використовують багатокомпонентний припій, який містить від 1,2 до 5,0 мас. % Sn, від 1,5 до 6 мас. % Ag, решта – Pb;

- паяння проводять протягом 5-10 секунд при температурі, що перевищує температуру ліквідусу припою від 20 до 30°C.

Метод паяння передбачає багато операцій і стадій, вимагає детального підбору флюсів, припоїв, а також повного видалення флюсу після пайки [16]. Крім того, в разі високотемпературної пайки комутації термоелектричний матеріал зазнає різкої термічної дії. Зазвичай, припої мають високі термічні та електричні опори, можлива також дифузія домішок з припою в напівпровідник [18]. Тому такий метод переважно використовується для комутації низькотемпературних (холодильних) модулів.

У цілому спільне пресування віток і комутацій – це високопродуктивна технологія. Однак за підвищених температур і тривалих циклічних навантажень електричний опір на границі «комутуюча пластина-напівпровідниковий матеріал» зростає, що зменшує надійність та ресурс роботи модулів [21].

У роботі Є.П. Сабо [22] зазначається, що при створенні спільним пресуванням сегментованих віток з низько- і середньотемпературних матеріалів певні труднощі викликає необхідність бічного прикладання тиску до порошків або брикетів сплавів на основі телуридів вісмуту і сурми. Уникнути порушення структури скомпактованого матеріалу у процесі комутації з використанням тиску можна, якщо локалізувати розігрів у досить тонкому приконтактному шарі, внесок якого в термоелектричну ефективність незначний. Враховуючи те, що прижимний контакт має підвищений електроопір, найбільш просто здійснити локальне розігрівання пропусканням електричного струму – контактне електрозварювання.

При контактному електрозварюванні металів використовуються струми, що розплавляють усю приконтактну область, але для зазвичай нетермостійких напівпровідників таке розігрівання викликає руйнування вітки високою термічною напругою. При пропусканні через прижимний контакт помірного струму Джоульське тепловиділення, зосереджене в окремих контактних плямах, викликає локальну деформацію, руйнування окисних плівок і утворення окремих центрів схоплювання. Електроопір контакту різко падає і, відповідно, зменшується локальне Джоульське розігрівання. В результаті центри схоплювання не встигають розростися. Контакт, здійснюваний по малій кількості плям невеликої площі, має низьку механічну міцність і недостатньо електро- та теплопровідність [22].

Ефективніше зварювання струмом можна здійснити через шар матеріалу у вигляді порошку, що дозволяє розширити область Джоулівського тепловиділення і використати зварювальний струм підвищеної сили без небезпеки руйнування контакту термічною напругою [22].

Щодо термічного напилення, то перевагами цього способу отримання комутаційних шарів металів у вакуумі є можливість автоматизації процесу та висока технологічність. Однак такий метод вимагає складного та дорогого обладнання і використовується переважно для нанесення тонких антидифузійних шарів [15].

Комутація термоелементів при технології плазмового нанесення антидифузійних та комутаційних шарів на напівпровідникові вітки модулів здійснюється за допомогою порошоків металів або сплавів, розпилених у струмені плазми. Міцність зчеплення комутаційних шарів, отриманих плазмовим напиленням, з термоелектричним матеріалом знаходиться в межах  $45 \div 75 \text{ кг/см}^2$ , контактний опір  $(3 \div 16) \cdot 10^{-6} \text{ Ом/см}^2$  [21; 23].

Методи хімічного та гальванічного нанесення металів на напівпровідники дають можливість уникнути труднощів, що виникають унаслідок термічного оброблення термоелементів у разі пайки, пресування, плазмового напилення, заливки розплавом, оскільки гальванічні процеси протікають за низьких температур. Гальванічний метод нанесення антидифузійних шарів та комутації простий у виконанні, не вимагає дорогого обладнання і дає можливість ефективно регулювати товщину осаджених шарів.

### Висновки

1. Одним із перспективних альтернативних джерел енергії є термоелектричні перетворювачі.

2. Сутність явища термоелектричного перетворення енергії полягає у тому, що якщо місця з'єднань провідників підтримувати при різних температурах, то на кінцях ланцюга виникає ЕРС, а при замиканні ланцюга в ній протікає електричний струм і навпаки – при пропусканні по ланцюгу електричного струму одні її контакти нагріватимуться, а інші – будуть охолоджуватися.

3. Значний інтерес визивають термоелементи на основі напівпровідникових матеріалів, які мають низьку теплопровідність і високу рухливість носіїв заряду ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{PbTe}$  тощо).

4. Наявні на сьогодні способи отримання нероз'ємних з'єднань напівпровідникового матеріалу з комутуючою пластиною під час виготовлення термоелементів (паяння, спільне пресування, напилення, гальванічне та хімічне нанесення комутаційних матеріалів) мають недоліки і не можуть повною мірою задовольнити вимоги до якості нероз'ємних з'єднань напівпровідникового матеріалу з комутуючою пластиною.

5. Актуальним є розроблення нового способу отримання нероз'ємних з'єднань напівпровідникового матеріалу з комутуючою пластиною у процесі виготовлення термоелементів.

6. Основними вимогами до отримання нероз'ємних з'єднань напівпровідникового матеріалу  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  з мідною комутуючою пластиною при виготовленні термоелементів є:

- необхідність нанесення на вітки модуля товстих антидифузійних шарів;

- температура процесу не повинна перевищувати  $252\text{-}262 \text{ }^\circ\text{C}$ , при максимальному значенні робочої температури гарячого спаю модуля до  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ , та  $316\text{-}331 \text{ }^\circ\text{C}$ , при максимальному значенні робочої температури гарячого спаю модуля до  $290 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- пластична деформація матеріалів, що зварюється, не повинна перевищувати  $0,5\text{-}1 \text{ } \%$ .

### Список використаних джерел

1. Анисимов М. А. Новые термоэлектрические материалы на основе редкоземельных гексаборидов для криогенных рефрижераторов и сенсоров / М. А. Анисимов // Материалы 51-й научной конференции Московского физико-технического института. – М., 2008. – С. 191.

2. Фреїк Д. М. Досягнення і проблеми термоелектрики 1. Історичні аспекти (Огляд) / Д. М. Фреїк, Л. І. Никируй, О. С. Криницький // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – Т. 13, № 2. – С. 297-318.



3. *LeTourneau University* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.letu.edu/news/2012/WeldingMJEResearchGrants560K.html>.
4. *LeTourneau University* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://www.letu.edu/\\_Academics/Engineering/Faculty/YoniAdonyi.html](http://www.letu.edu/_Academics/Engineering/Faculty/YoniAdonyi.html).
5. Шостаковський П. Термоелектрические источники альтернативного электропитания / П. Шостаковський // Компоненты и технологии. – 2010. – № 12. – С. 131-138.
6. Режим доступу : <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/449420/Jean-Charles-Athanase-Peltier>.
7. Pike B. Pike's Illustrated Descriptive Catalogue of Optical, Mathematical, and Philosophical Instruments. In II Volumes. Vol. II [Електронний ресурс]. – New York : Published by author at the his manufactory 294 Broadway, 1856. – 372 p. – Режим доступу : <http://www.scribd.com/doc/46292317/1856-Pike-s-Illustrated-Descriptive-Catalogue-of-Optical-Mathematical-Philosophical-Instruments-Volume-1>.
8. Kuel Fang Hsu, Sim Loo, Fu Guo, Wel Chen, J. Dyck, C. Uher, T. Hogan, E. Polychroniadis, M. Kanatzidis. Cubic AgPbmSbTe<sub>2+m</sub> bulk thermoelectric materials with high figure of merit // Science. – 2004. – V. 203. – P. 818-820.
9. Tang X. F., Chen L. D., Goto T., Dyck J. S., Chen W., Uher C., Hirai T., Yuan R. Z. Synthesis and High Temperature Thermoelectric Properties on n-type BayNixCo<sub>4-x</sub>Sb<sub>12</sub>. // Proc. XX ICT-2001. – P. 97-100.
10. Berardan D., Alleno E., Rouleau O., Godart C., Puyet M., Lenoir B., Scherrer H., Gerard L., Ravot D., Lackner R., Bauer E. Improved Thermoelectric Properties in the Double Filled Skutterudites (Ce-Yb)<sub>y</sub>(Fe-Co-Ni)<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> // Proc. 8 EWT. Krakow, 2004.
11. Тушенцова Е. Н. Термоелектрический модуль (ТЭМ) [Электронный ресурс] / Е. Н. Тушенцова // Четвертая Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая весна 2011: Машиностроительные технологии» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Режим доступа : <http://studvesna.qform3d.ru?go=articles&id=351>.
12. Uher C. Skutterudite Based Thermoelectrics. Handbook of Thermoelectrics, Edited by Rowe, CRC Press, 2006. – P. 34-1 – 34-17.
13. Горський П. В. Електропровідність контактуючих часток термоелектричного матеріалу / П. В. Горський, В. П. Михальченко // Термоелектрика. – 2013. – № 2.
14. Сабо Е. П. Технология халькогенных термоэлементов. Физические основы. Глава 3. Технология коммутации ветвей термоэлемента. 3.1. Коммутационные переходы / Е. П. Сабо. – Грузия, 2010.
15. Термоелектричні модулі для генераторів на газовому органічному паливі / Л. І. Анатичук, Є. І. Антонюк, В. Я. Михайловський, О. Я. Лусте, Л. М. Вихор, І. С. Термена // Термоелектрика. – 2006. – № 4.
16. Охотин А. С. Термоелектрические генераторы / А. С. Охотин, А. А. Ефремов, В. С. Охотин. – М. : Атомиздат, 1971. – 288 с.
17. Kaible H. T., Rauscher L., Fujimoto S., Kurosawa T., Kauda T. Development of thermoelectric generating cascade modules using silicide and Bi-Te // Proc. 23 rd International Conference on Thermoelectrics. – Australia. – 2004. – P. 13.
18. Малыгин Е. А. Исследования термоелектрических батарей, скоммутированных на основе вакуумных конденсаторов кобальта / Е. А. Малыгин, М. П. Козорезов, А. М. Черников // Гелиотехника. – 1973. – № 3. – С. 27-31.
19. Термоелектрические батареи на основе сплавов Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> с рабочей температурой до 300 °С. Термоелектрики и их применение / А. А. Пустовалов, В. В. Гусев, Л. П. Небера, М. И. Панкин, Н. Н. Рыбкин // Доклады VIII Международного семинара. – СПб., 2002. – С. 357-362.
20. Способ изготовления термоелектрических модулей. Н01L21/50, Н01L35/34 (РФ) / Ю. П. Прилепо, А. А. Кичкайло. – Заявл. 11.07.2001, опубл. 20.12.2002.
21. Алтырцев Г. А. Коммутация термоэлементов на основе Pb-Te и Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> / Г. А. Алтырцев, Ю. Н. Малевский // Теплоэнергетика. – 1961. – Вып. 3. – С. 61-67.
22. Сабо Е. П. Технология халькогенных термоэлементов. Физические основы. Глава 3. Технология коммутации ветвей термоэлемента. 3.3. Контактная электросварка / Е. П. Сабо. – Грузия, 2010.
23. Способ коммутации термоэлементов : а.с. №1642911 (СССР) / В.Г. Швецов (СССР). – Заявл. 25.03.87, опубл. 30.03.89.