

УДК 62-45,608.2



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І., Ніцович О.В.

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



Ніцович О.В.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОШАРОВИХ
ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ З ПЕРІОДИЧНО
ПРОФІЛЬОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ**

В роботі наведено результати комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження нового типу поперечних термоелементів - двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею. Показано, що відхилення розрахованих та експериментально отриманих значень потужності та поперечної щодо градієнта температур термоЕРС складає не більше 6%. Встановлено, що використання двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею дає можливість отримати більші значення поперечної ЕРС, потужності та ККД у порівнянні з анізотропними та короткозамкненими термоелементами.

Ключові слова: поперечна термоЕРС, термоелемента з періодично профільованою поверхнею.

In the work the results of computer simulation and experimental research of a new type of transverse thermoelements, i.e. a double-layer thermoelement with a periodically profiled surface are presented. It is shown that the deviation of the computed and experimentally obtained values of power and transverse thermoEMF in relation to temperature gradient is no more than 6%. It has been established that the application of the double-layer thermoelements with the periodically profiled surface makes it possible to obtain big values the transverse thermoEMF, power and efficiency in comparison with anisotropic and short-circuited thermoelements.

Key words: transverse thermoEMF, thermoelement with a periodically profiled surface.

Вступ

Зацікавлення термоперетворювачами поперечного типу виникло ще в 70-х роках минулого століття у зв'язку з їх привабливими властивостями – залежністю поперечної термоЕРС від геометричних розмірів термоелементів та відсутністю комутацій, для пошуку конструкцій малоінерційних детекторів вимірювання. Ці обставини, наприклад, дають можливість зі зменшенням товщини термоелемента підвищувати їх швидкодію без втрат вольтватної чутливості. Отже, термоперетворювачі поперечного типу перспективні для створення швидкодіючих термоелектричних приладів. Однак напівпровідникові матеріали, для яких властива анізотропія термоЕРС і які використовуються для створення анізотропних термоелементів, мають порівняно низьку термоелектричну добротність [1-4]. Хоча на їх основі можна створити високовольтні термоелементи, ЕРС яких визначається співвідношенням

геометричних розмірів орієнтованих монокристалів, потужність, що генерується одиницею об'єму таких елементів, набагато менша, чим у звичайних генераторів Зесбека.

Актуальною є проблема пошуку нових типів термоелементів, які би дозволили покращити робочі характеристики термоелектричних приладів, зокрема, шляхом оптимізації конструкції та режимів роботи термоелементів. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють провести оптимізацію нових конструкцій термоелементів та виявити їх переваги над іншими типами термоелементів.

Метою даної роботи є експериментальне дослідження термоелементів нового типу – двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею та порівняння результатів експериментального дослідження з результатами комп'ютерного моделювання.

Моделювання двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею

Фізичну модель двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею зображена на рис. 1.

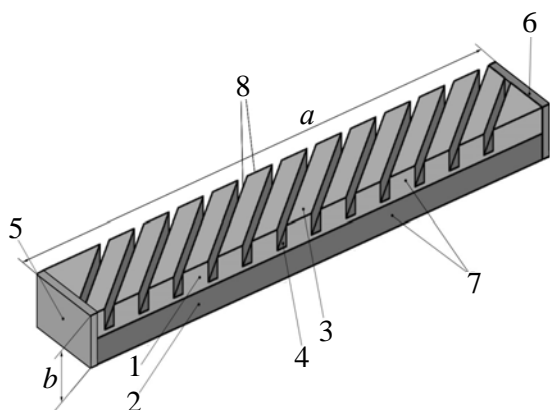


Рис. 1. Двошаровий термоелемент з періодично профільованою поверхнею [5].

- 1 – матеріал p -типу провідності;
- 2 – матеріал з n -типу провідності;
- 3 – ребра з матеріалу p -типу;
- 4 – пази у матеріалі p -типу;
- 5, 6 – електричні контакти;
- 7, 8 – бічні грані термоелемента, на яких розташовують джерела та стоки тепла;

a, b – геометричні розміри термоелемента.

Термоелемент складається з матеріалів n - та p -типу провідності. Один із шарів термоелемента має періодичну профільну зовнішню поверхню із системою ребер та пазів, які орієнтовані під кутом до граней бруска. Грані 7 та 8 термостатовані за різних температур T_1 та T_2 . Інші зовнішні сторони термоелемента знаходяться в умовах теплової ізоляції. Електричні контакти являють собою тонкі металеві шари з високою електропровідністю і тому є практично екіпотенціальними в межах одного контакту.

Така шарувата структура може розглядатися як штучно анізотропне середовище. За різних температур бічних граней термоелемента 7 і 8 (рис. 1) у ньому виникає поперечна до теплового потоку термоЕРС. Як і в анізотропному термоелементі, величина поперечної ЕРС залежить від відношення геометричних розмірів a/b . Однак у цьому випадку на величину поперечної ЕРС будуть впливати і параметри профільованого шару термоелемента. Тому величину поперечної термоЕРС E_{\perp} можна подати у вигляді

$$E_{\perp} = \Delta\alpha \Delta T \frac{a}{b} f(\varphi, n), \quad (1)$$

де ΔT – різниця температур на термоелементі, $\Delta\alpha$ – різниця коефіцієнтів Зесбека матеріалів шарів робочого тіла, $f(\varphi, n)$ – функція від кута нахилу замикаючих елементів (ребер) φ до

гарячої грані термоелемента та від числа періодів профілю профільованого шару n на одиницю довжини термоелемента a ; b – віддаль між гарячою та холодною гранями термоелемента.

У роботах [5-6] наведено результати багатопараметричної оптимізації даного термоелемента шляхом комп'ютерного моделювання. В основі цієї моделі лежить метод скінченних елементів, який полягає в тому, що робоче тіло термоелемента розбивається на велику кількість скінченних елементів і в кожному з них шукається значення функції, яке задовольняє заданим диференціальним рівнянням з відповідними граничними умовами.

Розрахунки проводилися для термоелемента з матеріалів на основі Bi_2Te_3 . З результатів комп'ютерного моделювання встановлено, що для будь-якої геометрії та термоелектричних параметрів шарів термоелемента чим менша величина d_1/d_2 (рис. 2), тим більша поперечна термоЕРС термоелемента, а відповідно і його ККД. Поперечна термоЕРС є немонотонною функцією і досягає максимуму за певних значень “шпаруватості” δ_1/δ_2 (рис.2) профільованого шару.

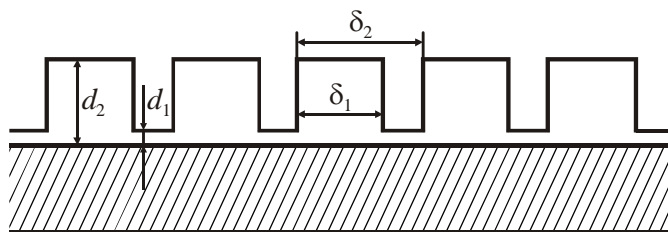


Рис. 2. Геометричні параметри профільованого шару термоелемента.

Було показано, що для будь-якої “шпаруватості” профільованої поверхні поперечна термоЕРС досягає максимального значення, коли величина електропровідності профільованого шару вдвічі більша за електропровідність нижнього шару термоелемента.

Встановлено, що зі збільшенням відношення товщин профільованого та не профільованого шарів термоелемента величини ЕРС та потужності збільшуються. Залежності електрорушійної сили та електричної потужності термоелемента від відношення геометричних розмірів є монотонними функціями, які зростають зі збільшенням величини a/b .

Для перевірки результатів комп'ютерного моделювання та практичного підтвердження ефективності двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею було виконано експериментальні дослідження. Проведена робота містила наступні етапи: синтез термоелектричних матеріалів, вимірювання температурних залежностей кінетичних параметрів даних матеріалів, отримання методами екструзії двошарових стержнів, виготовлення зразків двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею, вимірювання ЕРС, потужності та ККД отриманих двошарових термоелементів.

Виготовлення двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею

Для виготовлення зразків штучно-анізотропних термоелементів було синтезовано термоелектричні матеріали складу Bi_2Te_3 (75%) + Bi_2Se_3 (25%) та Bi_2Te_3 (30%) + Sb_2Te_3 (70%) (n - та p -типу відповідно).

Наступним кроком було отримання двошарових стержнів термоелектричного матеріалу – заготовок для майбутніх профільованих термоелементів – шляхом термомеханічної обробки синтезованого матеріалу. Термомеханічна обробка передбачає пластичну деформацію (екструзію) заготовок через фільтру з заданим профілем та наступний відпал стержня. Така

методика дозволяє отримувати калібровані стержні різного перерізу та профілю з рівномірним розподілом властивостей матеріалу по всій його довжині.

Таким чином, шляхом екструзії заготовки, яка складалася з двох рівних частин n - та p - типу провідності (рис. 3, а) отримано двошарові стержні з поперечним перерізом $4.1 \times 4.1 \text{ мм}^2$. Зовнішній вигляд готових двошарових стержнів термоелектричного матеріалу показано на рис. 1,б.

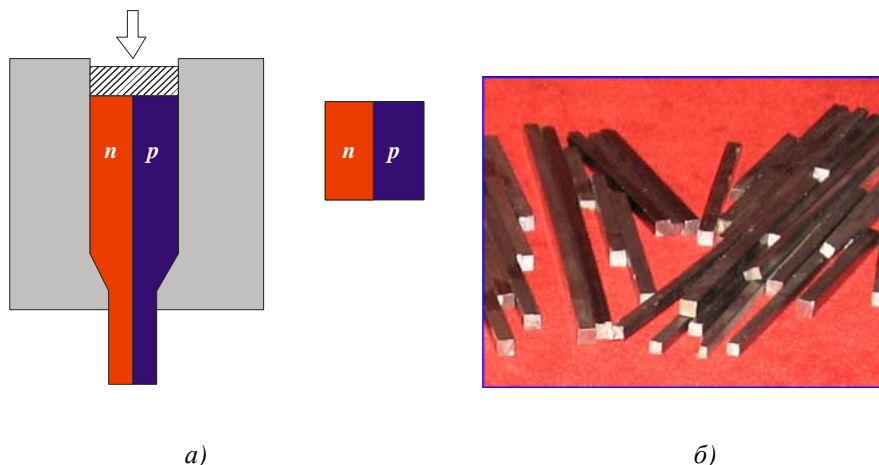


Рис. 3. Схема отримання двошарового стержня термоелектричного матеріалу шляхом екструзії (а) та зовнішній вигляд стержнів (б).

Для визначення температурних залежностей кінетичних параметрів зон термоелектричного матеріалу з отриманих стержнів було вирізано зразки, які містять матеріал тільки однієї з зон. Для отриманих зразків n - та p -типів провідності було виміряно температурні залежності кінетичних параметрів в інтервалі температур $290 \div 580 \text{ К}$. Вигляд цих залежностей, а також термоелектричної добротності матеріалу наведено на рис. 4.

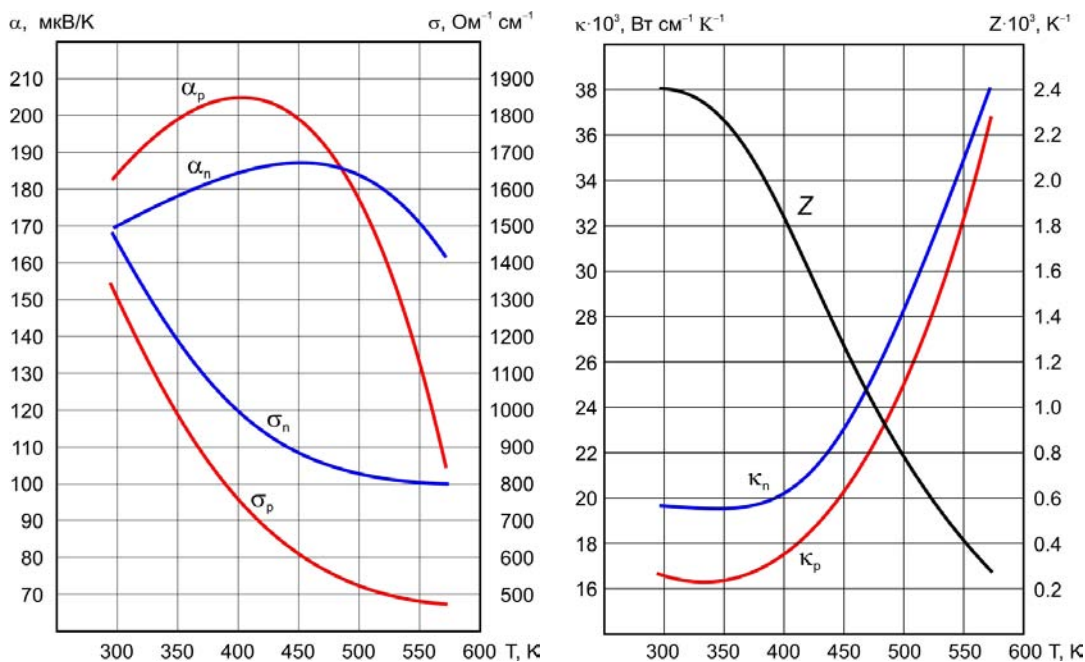


Рис. 4. Температурні залежності коефіцієнта термоЕРС, питомої електропровідності, питомої теплопровідності зон та добротності термоелектричного матеріалу.

Подальша підготовка до виготовлення робочого тіла термоелемента включала розріз двошарових стержнів на зразки певної довжини, виконання профілювання одного із шарів зразка та шліфування зразків.

Для проведення експериментальних досліджень двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею було виготовлено зразки з поперечним перерізом $4 \times 3.5 \text{ мм}^2$ та довжиною 10 мм. Товщина суцільного непрофільованого шару $\delta_1 = 1.5 \text{ мм}$, товщини в профільованому шарі $\delta_2 = 0.2 \text{ мм}$, $\delta_3 = 2.3 \text{ мм}$ (рис. 5.). Ширина ребра профільованого шару – 0.24 мм, ширина пазу – 0.67 мм.

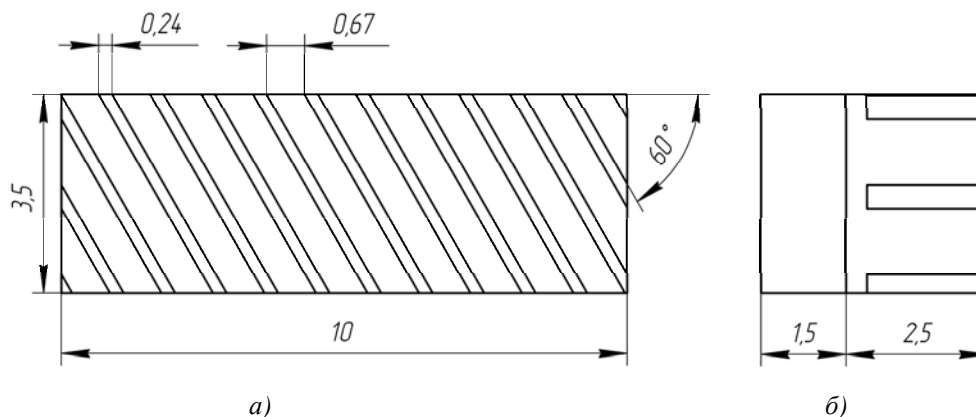


Рис.5. Фронтальна (а) та бокова (б) проекції профільованого термоелемента.

Зовнішній вигляд готового двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею показано на рис. 6.

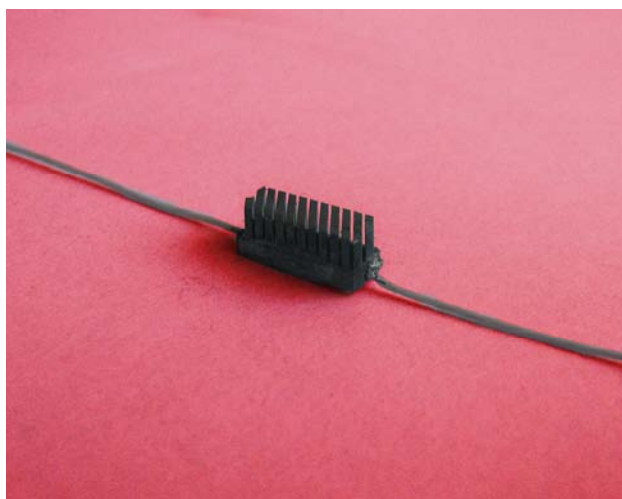


Рис. 6. Двошаровий термоелемент з періодично профільованою поверхнею.

Схема експерименту по вимірюванню ЕРС, потужності та ККД профільованих термоелементів

Схему експериментальної установки для вимірювання ЕРС та потужності шаруватих термоелементів показано на рис. 7.

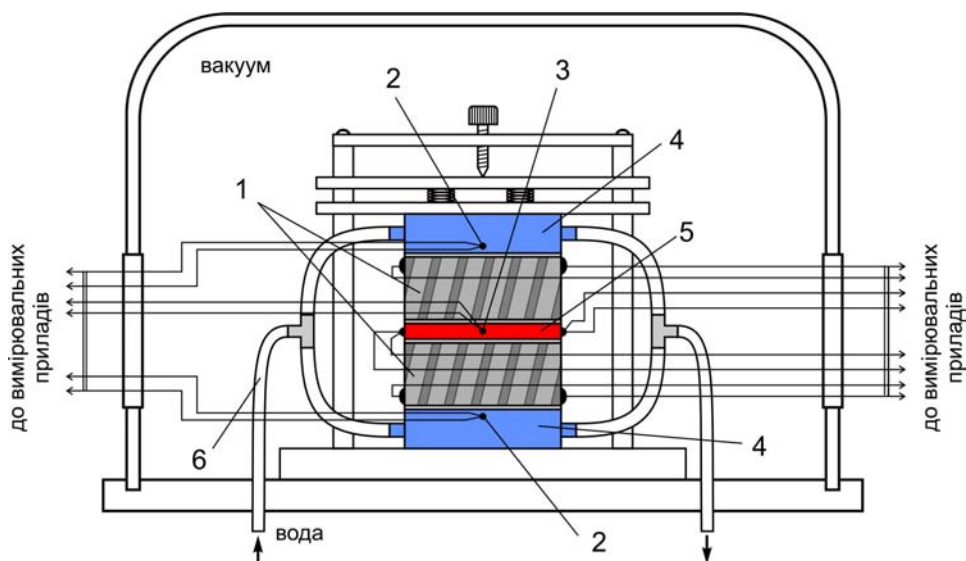


Рис.7. Схема експериментальної установки для дослідження двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею:

- 1 – двошарові термоелементи, 2 – термопари для контролю температури холодних граней,
 3 – термопара для контролю температури гарячих граней,
 4 – тепловідводи, 5 – нагрівник, 6 – магістраль для подачі води до тепловідводів.

Вимірювання проводиться для двох двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею 1, які включені в електричне коло послідовно. Температура гарячих граней термоелементів задається нагрівником 5 та контролюється термопарою 3. Температура холодних граней контролюється термопарами 2 та задається тепловідводами 4, через які по магістралі 6 циркулює вода заданої температури. Всі вимірювання проводяться в умовах вакууму 10^{-5} мм. рт. ст. На рис. 8 показано установку в процесі проведення експерименту.

У ході досліджень вимірювалися залежності ЕРС та потужності двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею від температури гарячої грані. Температура холодної грані термоелемента складала 290 К. Термоелектрорушійна сила пари термоелементів вимірювалася у ненавантаженому колі.

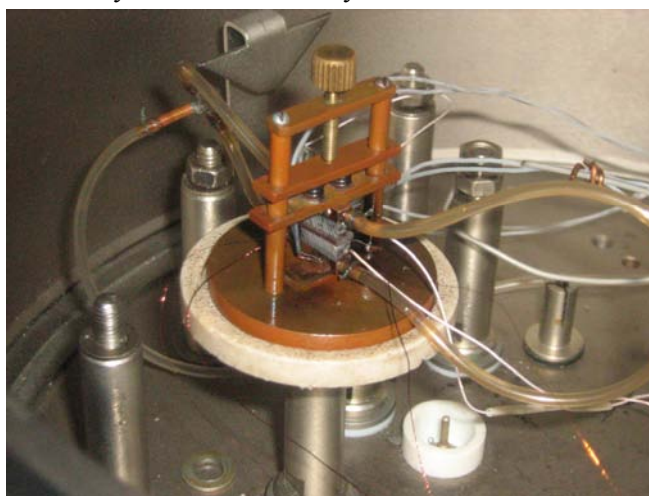


Рис.8. Установка для вимірювання ЕРС та потужності двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею.

Результати експериментальних досліджень двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею

Для визначення опору термоелементів, максимальної потужності W та ККД було знято навантажувальні характеристики. При оптимальному навантаженні термоелементів фіксувалася електрична потужність, що підводиться до нагрівника та з урахуванням теплових втрат по електричних провідниках і термопарі, а також випромінюванням з бокових поверхонь нагрівника, визначався тепловий потік Q , що проходить через термоелементи.

На рис. 9 наведено вигляд навантажувальних характеристик включеної послідовно пари двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею, отриманих на експерименті.

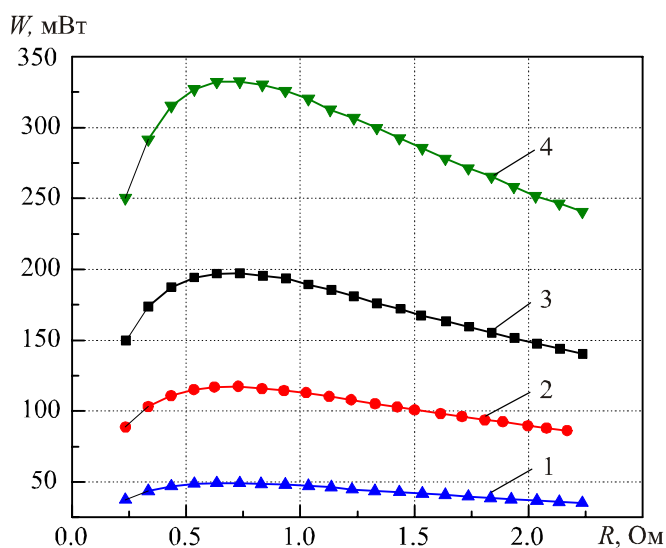


Рис.9. Навантажувальні характеристики включеної послідовно пари двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею при різних перепадах температур:
1 - $\Delta T=84$ К; 2 - $\Delta T=130$ К; 3 - $\Delta T=185$ К; 4 - $\Delta T=285$ К.

Для порівняння експериментальних результатів з розрахунками комп'ютерної моделі було проведено комп'ютерне моделювання. В процесі моделювання розраховано значення поперечної термоЕРС та потужності двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею довжиною 20 мм., що задовольняє умові послідовного з'єднання двох термоелементів довжиною по 10 мм кожен.

Результати вимірювання залежності поперечної термоЕРС від перепаду температур на термоелементі та відповідних комп'ютерних експериментів наведено на рис. 10.

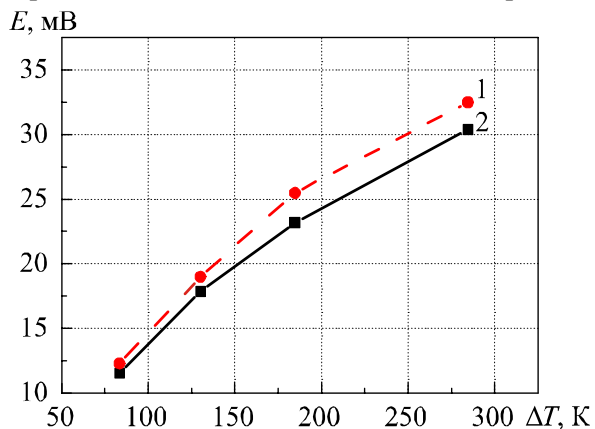


Рис. 10. Залежність поперечної термоЕРС двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею від перепаду температур на термоелементі:
1 – комп'ютерний експеримент, 2 – фізичний експеримент.

На рис. 11 наведено графіки залежностей потужності двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею термоелемента від перепаду температур на термоелементі. Відхилення розрахованих комп'ютерним моделюванням та експериментально визначених значень потужності складають не більше 6% і лежать в межах похибки експерименту.

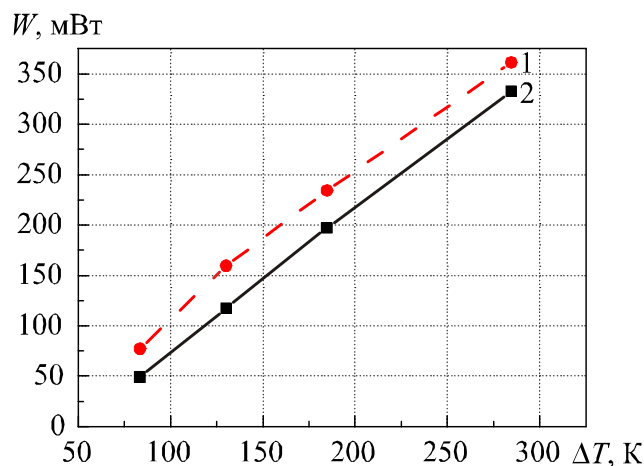


Рис. 11. Залежність електричної потужності двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею від перепаду температур на термоелементі:

1 – комп'ютерний експеримент, 2 – фізичний експеримент.

Отже, двошарові термоелементи з періодично профільованою поверхнею розширюють елементну базу термоелектрики та є перспективними для використання в якості термочутливих елементів різних теплометричних приладів. Вони сприяють розвитку та створенню на їх основі детекторів випромінювання, датчиків теплового потоку, мікрокалориметрів, тепломірів.

Висновки

1. Виготовлено двошаровий термоелемент з періодично профільованою поверхнею, який при перепаді температури 285 К генерує поперечну термоЕРС рівну 30.4 мВ, при цьому потужність – 332 мВ.
2. Експериментально підтверджено результати комп'ютерного моделювання двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею. Показано, що відхилення розрахованих та експериментально отриманих значень ЕРС та потужності складає не більше 6%.
3. Використання двошарових термоелементів з періодично профільованою поверхнею дає можливість отримати більші значення поперечної ЕРС, потужності та ККД порівняно з анізотропними та короткозамкненими. Це розширює можливості практичних застосувань поперечних термоелектрорушійних сил.

Література

1. Голдсмід Х. Дж. Искусственные поперечные термоэлементы с пористым компонентом /Х. Дж. Голдсмід // Термоелектричество. – 2008. – №1. – С. 7–12.
2. Голдсмід Х. Дж. Матеріали для штучних поперечних термоелектричних приладів / Х. Дж. Голдсмід // Термоелектрика. – 2008. – №4. – С. 42–51.
3. Goldsmid, H. J., GEC Journal, **29**, 1963, p. 158.

4. Анатичук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – К.: Наукова думка, 1979. - 768с.
5. Анатичук Л. І. Комп'ютерне моделювання процесів перетворення енергії у двошаровому термоелементі з періодично профільованою поверхнею / Л.І. Анатичук, О.Я. Лусте, О.В. Ніцович // Термоелектрика. – 2007. – №2. – С.74-82.
6. Анатичук Л. І. Температурні залежності параметрів двошарового термоелемента з періодично профільованою поверхнею / Л.І. Анатичук, О.Я. Лусте, О.В. Ніцович // Термоелектрика. – 2008. – №2. – С.32-40.

Надійшла до редакції 26.02.2015