

О.М. Матківський<sup>1</sup>, В.І. Маковишин<sup>2</sup>, Т.І. Купчак<sup>1</sup>, Г.Д. Матеїк<sup>3</sup>, І.В. Горічок<sup>1</sup>

## Термоелектричні властивості композитних матеріалів на основі телуриду свинцю

<sup>1</sup> Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна,  
[o.matkivsky@opora.org.ua](mailto:o.matkivsky@opora.org.ua)

<sup>2</sup> Івано-Франківський національний медичний університет, Івано-Франківськ, Україна

<sup>3</sup> Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

З метою зменшення теплопровідності термоелектричних матеріалів на основі пресованого PbTe, проведено дослідження композитних матеріалів на основі механічних сумішей мікродисперсного PbTe та нанодисперсного додаткового компоненту ZnO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> (50-70 нм) чи мікродисперсного CdTe (32-50 мкм). Проведено вимірювання питомої електропровідності, коефіцієнта термо-ЕРС та коефіцієнта теплопровідності досліджуваних зразків. Встановлено, що досягнення низьких значень коефіцієнта теплопровідності ускладнюється процесами агломерації нанодисперсного компоненту при температурах отримання та обробки композитних зразків, а також хімічною взаємодією компонентів добавки і матриці.

**Ключові слова:** пльомбум телурид, термоелектричні властивості, композитні матеріали.

Подано до редакції 11.01.2022; прийнято до друку 23.06.2022.

### Вступ

З поміж різних альтернативних джерел енергії термоелектричні генератори вирізняються високою надійністю та довготривалістю роботи без необхідності періодичного обслуговування [1-7]. Це визначає перспективність їх використання, зокрема, для військово-технічних потреб та потреб космічної промисловості. Основним недоліком термоелектричних перетворювачів є відносно низький, порівняно наприклад з фотоелектричними перетворювачами, коефіцієнт корисної дії. Одним із способів вирішення цієї проблеми є модифікація властивостей вже відомих матеріалів, що використовуються у термоелектричних перетворювачах.

Одним з найбільш відомих матеріалів, що використовується для створення середньо температурних (робота в діапазоні 300-500°C) термоелектричних генераторів (ТЕГ) є телурид свинцю. Покращення експлуатаційних параметрів PbTe значно б розширило сферу використання ТЕГ на

його основі.

Коефіцієнт корисної дії термоелектричного перетворювача  $\eta$  функціонально залежить від термоелектричної добротності матеріалу  $Z$ :

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}}$$

Тут  $T_h$ ,  $T_c$  – температури гарячого та холодного кінців термоелемента. Величина  $Z$  визначається виключно параметрами матеріалу:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{k}$$

Тут  $\sigma$  – питома електропровідність,  $\alpha$  – коефіцієнт термо-ЕРС,  $k$  – коефіцієнт теплопровідності. Складність задачі підвищення величини  $Z$  полягає у тому, що одночасно з підвищенням питомої електропровідності матеріалу, наприклад шляхом легування, внаслідок збільшення концентрації носіїв, зростає теплопровідність матеріалу та зменшується коефіцієнт термо-ЕРС. В результаті суттєвого

покращення термоелектричної добротності не спостерігається. З огляду на це, перспективним може бути створення матеріалів у яких термоелектричними параметрами можна керувати роздільно. Одним з прикладів є використання композитних метрiалів отриманих шляхом пресування суміші порошків різних матеріалів [3].

Метод пресування порошку забезпечує утворення значної кількості міжзеренних меж у зразку, що повинно сприяти зменшенню його коефіцієнта теплопровідності, а керуючи тиском та розміром фракцій можна ефективно керувати і питомою електропровідністю зразків та, у випадку розміру зерен співмірному з довжиною вільного пробігу електронів, але меншому ніж довжина його хвилі [3], коефіцієнтом термо-ЕРС. Таким чином можна керувати основними термоелектричними параметрами при отриманні зразків, причому їх числові значення можуть суттєво відрізнятися від аналогічних параметрів для монокристалів [8-9]. Крім того, зважаючи на використання для отримання термоелементів порошку, не виникає необхідності вирощування монокристалів, що є складною технологічною процедурою, а можна проводити синтез полікристалічних зливків.

Згідно [10], для термоелементів оптимальні фракції –  $d = (1-100)$  мкм. Використання для пресування нанодисперсних порошків призводить до підвищення питомої електропровідності зразків та зменшення їх коефіцієнту теплопровідності. При використанні нанодисперсних матеріалів залежність властивостей від технологічних факторів отримання стає ще більш суттєвою [11-13] і досягнення вищих значень ZT у порівнянні з мікродисперсними порошками не завжди є можливим. Крім того, у випадку використання гарячого пресування чи відпалів, актуальною постає проблема агломерації наночастинок [14]. Ще одним фактором, який ускладнює прогнозування властивостей нанодисперсних матеріалів є зміна його фундаментальних властивостей при зменшенні розміру [11].

Додаткового покращення властивостей пресованих зразків, зокрема зменшення його теплопровідності, можна досягти шляхом додавання до мікродисперсного порошку базового матеріалу нанодисперсного порошка тугоплавких оксидів (ZnO, SiO<sub>2</sub>, та ін..) [15-18]. Причому, згідно [3], природа нанодисперсної добавки практично не впливає на ефект зниження теплопровідності. Можна також використовувати наночастинки металів. Проте у цьому випадку очікуваний ефект полягає у підвищенні питомої електропровідності зразка за рахунок створення між зернами високопровідного металевого контакту [19]. Згідно [20] створення композитів на основі PbTe з діелектричним наповнювачем може бути одним із способів вирішення проблеми високої крихкості матеріалів р-типу, оскільки при легуванні до концентрацій дірок  $p \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$  домішкові атоми суттєво блокують рух дислокацій.

У даній роботі з метою встановлення можливості зменшення коефіцієнту теплопровідності пресованих

зразків проведено дослідження композитних матеріалів на основі механічних сумішей мікродисперсного PbTe та нанодисперсного додаткового компоненту.

## I. Методика експерименту

Детально методика отримання дослідних зразків та синтезу PbTe, описана в роботі [21, 22], а методика вимірювання термоелектричних параметрів у [21].

Синтез PbTe проводили у вакуумованих кварцових ампулах [21]. Отримані злитки подрібнювали, відбирали фракції (50-500) мкм, пресували під тиском 1,5 ГПа та піддавали відпалу при температурі 500°C. Час витримки під тиском становив 15 хв.

У випадку отримання композитних зразків, порошок базового матеріалу PbTe перемішувався з нанодисперсним порошком ZnO, TiO<sub>2</sub> чи SiO<sub>2</sub>. Розмір часток становив 50-70 нм. Матеріали додаткового компоненту, згідно [3], повинні володіти практично нульовою електропровідністю (для відсутності шунтування термо-ЕРС генеровану зернами базового матеріалу), що для вищезгаданих матеріалів виконується. Для більшості досліджуваних зразків концентрація додаткового нанокомпоненту становила 1 мас. %.

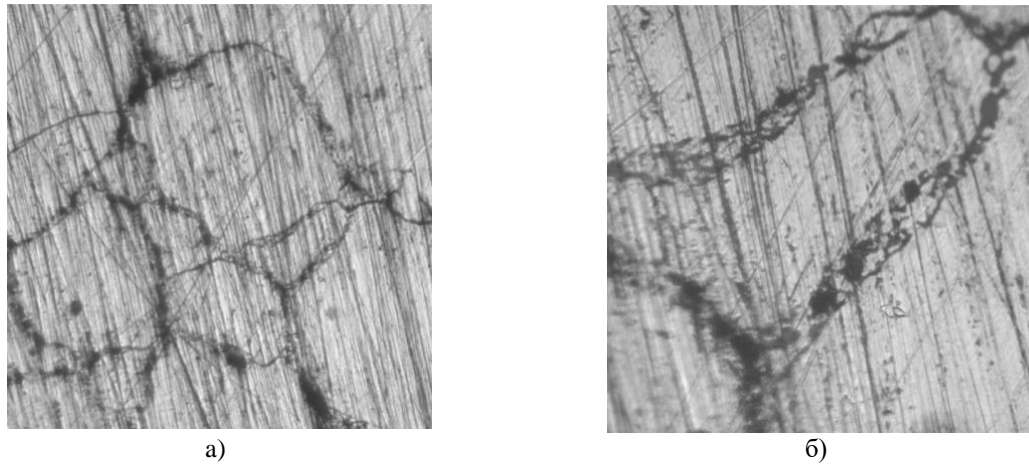
Фазовий склад і структуру синтезованих злитків та зразків досліджували X-дифракційними методами. Морфологія поверхні вивчалась з використанням оптичного та скануючого електронного мікроскопа.

## II. Результати дослідження та їх обговорення

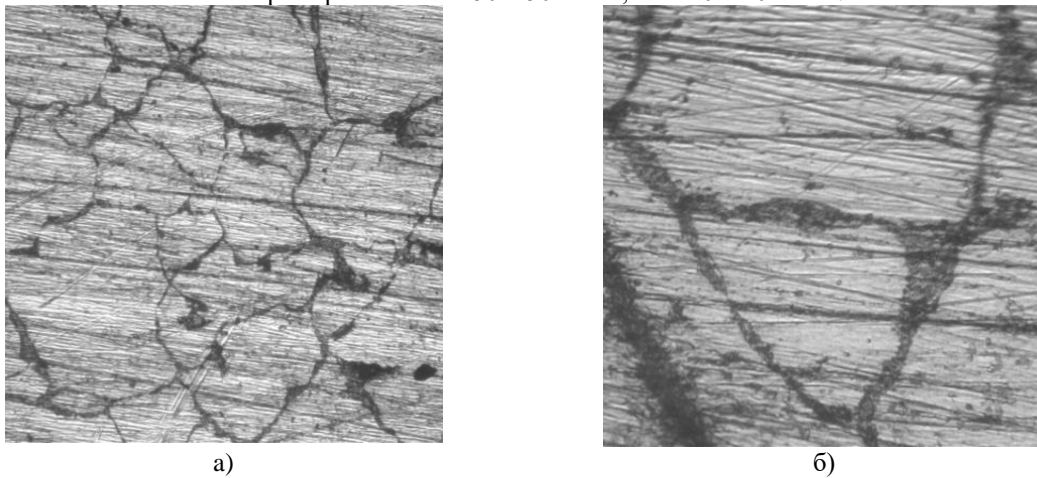
Результати оптичної мікроскопії поверхні зразків (рис. 1) дають підстави вважати, що нанодисперсний компонент перешкоджає їх ущільненню, принаймні до рівня ущільнення бездомішкового матеріалу. Мікротвердість композитних матеріалів є вищою ( $HV = 365$  МПа при 1 мас. % ZnO) у порівнянні з бездомішковым PbTe ( $HV = 297$  МПа) сформованих за однакових технологічних умов.

Морфологія поверхні зразків PbTe-SiO<sub>2</sub> (рис. 2) є аналогічною до PbTe-ZnO. Твердість зразків з 1,0 мас. % SiO<sub>2</sub> після відпалу становить  $HV = 436$  МПа.

На основі X-променевих дифракційних досліджень (таблиця) встановлено, що додавання 1 мас. % оксиду цинку збільшує величину параметра елементарної комірки базового матеріалу, а рефлексії від фази ZnO не фіксуються, ймовірно, через те, що величина 1 мас. % знаходиться на межі чутливості методу. При вмісті ZnO 3 % у зразках фіксується додаткова фаза елементарного свинцю. Такий результат може свідчити про хімічну взаємодію базового матеріалу та нанорозмірної добавки. Дифузії компонентів нанодобавки, зокрема, відзначена у роботі [23], у якій Ti з TiO<sub>2</sub> проникав у матричний матеріал.



**Рис. 1.** Структура поверхні композитного зразка PbTe+1 мас. % ZnO.  
Розмір зображень: а – 450x450 мкм<sup>2</sup>, б – 110x110 мкм<sup>2</sup>.



**Рис. 2.** Структура поверхні композитного зразка PbTe+ 1 мас.% SiO<sub>2</sub>.  
Розмір зображень: а – 450x450 мкм<sup>2</sup>, б – 110x110 мкм<sup>2</sup>.

#### Таблиця

Результати X-дифракційного аналізу пресованих зразків з механічних сумішей порошків PbTe-ZnO.

Склад зразка	Фазовий склад	Параметр елементарної комірки a (Å)
PbTe	PbTe	6.45892(19)
PbTe + 1 mass.% ZnO	PbTe	6.4599(2)
PbTe + 3 mass.% ZnO	PbTe, Pb (ST Cu) ~ 0.5 wt. %	6.4582(2)

Аналіз термоелектричних властивостей досліджуваних зразків свідчить, що додавання нанодисперсного компоненту не дозволяє досягнути бажаного результату: зменшення коефіцієнта теплопровідності не спостерігається для жодної з нанодобавок. А для деяких зразків навіть спостерігається деяке підвищення величини  $k$ . Причому, варто зазначити, що вплив різних за хімічним складом нанодобавок є практично однаковим. Основна відмінність у термоелектричних властивостях PbTe-SiO<sub>2</sub>, PbTe-ZnO та PbTe-TiO<sub>2</sub>, на яку варто звернути увагу, полягає у тому, що додавання діоксиду кремнію, на відміну від інших, зменшує електропровідність зразків (рис. 3). Проте,

теплопровідність зразків, як і для інших матеріалів з нанодисперсним компонентом, в межах похибки не змінюється порівняно з бездомішковим PbTe.

Вимірювання коефіцієнту теплопровідності проводилось методом радіального теплового потоку (похибка вимірювань  $\pm 20\%$ ). Звичайно, це значно вище ніж показник похибки у методі LFA ( $\pm 5\%$ ). Але варто зазначити, що отримувані дані завжди були відтворюваними для кількох зразків (на графіку приводяться дані тільки для одного). Таким чином, відносні зміни у коефіцієнті теплопровідності для різних зразків можна вважати достовірними.

Варто зазначити, що використаний метод вимірювання теплопровідності (метод радіального теплового потоку) характеризується високою (до  $\pm 20\%$ ) порівняно з іншими сучасними методами похибкою вимірювання, зокрема LFA (до  $\pm 5\%$ ). Проте отримувані нами дані завжди були відтворюваними для кількох зразків (на графіках приводяться дані для одного, щоб не ускладнювати порівняння властивостей різних зразків, загромождаючи рисунок точками), а тому відносні зміни у коефіцієнті теплопровідності для різних зразків можна вважати достовірними та надійними даними.

Термоелектричні властивості композитних матеріалів на основі телуриду свинцю

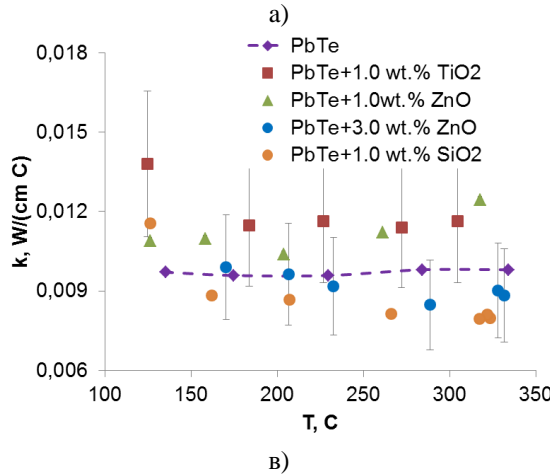
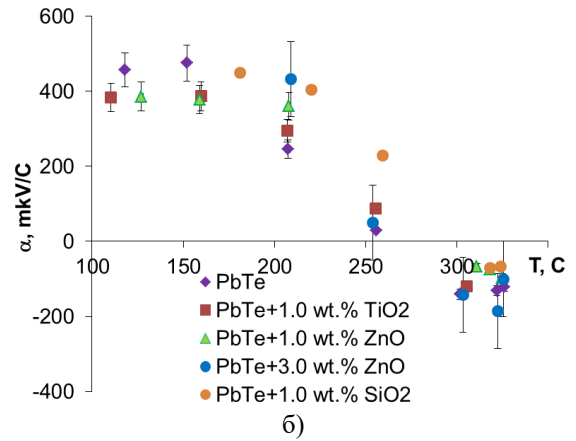
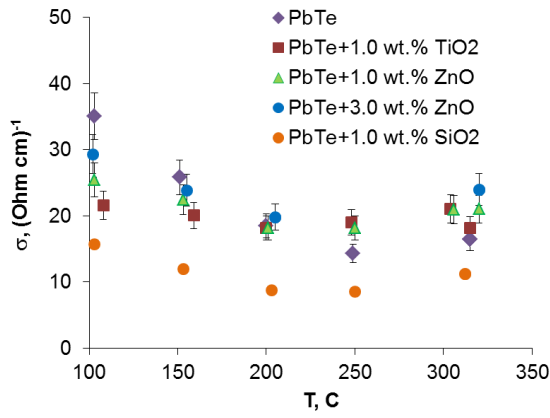


Рис. 3. Температурна залежність питомої електропровідності  $\sigma$  (а), коефіцієнта термо-ЕРС  $\alpha$  (б) та коефіцієнта теплопровідності  $k$  (в) зразків PbTe з домішками нанодисперсних порошоків.

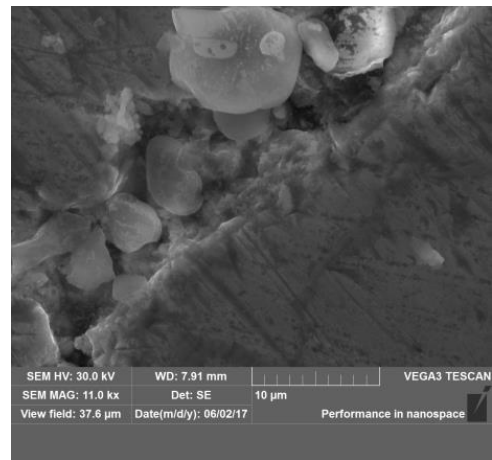
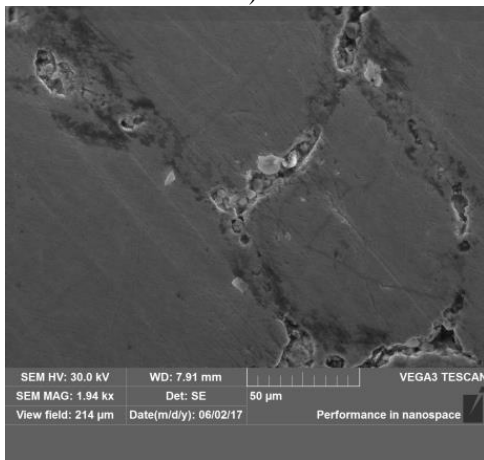


Рис. 4. СЕМ-зображення відпалених композитних зразків PbTe + 1 мас.% ZnO.

Пояснення ефекту збільшення коефіцієнта теплопровідності при додаванні нанодисперсних оксидів отримано при детальному дослідженні структури границь зерен з використанням СЕМ (рис. 4). Встановлено, що введені нанорозмірні частинки оксиду цинку об'єднуються з утворенням агломератів розміром до кількох мікрометрів, що може бути одним з факторів, який перешкоджає рекристалізації пресованих зразків.

У досліджуваних зразках, вочевидь, є два способи проходження фононів між кристалітами PbTe: частково по в деякій мірі сформованих міжзеренних контактах між PbTe, а частково, через зерна ZnO (чи TiO<sub>2</sub>). І, ймовірно, у другому випадку теплопровідність буде кращою, оскільки, по перше,

нанодисперсні порошоків агломерували, збільшивши цим площу каналу для проходження фононів, а, по друге, теплопровідність ZnO майже на порядок вища за теплопровідність PbTe. Таким чином, узагальнюючи експериментальні дані отримані для різних матеріалів, можна стверджувати, що додаткові фази у середньо чи високотемпературних термоелектричних матеріалах окрім низької питомої електропровідності повинні характеризуватись низькими значеннями коефіцієнта теплопровідності і високою температурою плавлення, що частково скомпенсуватиме ефекти пов'язані з їх агломерацією.

Спостережувані закономірності у властивостях системи PbTe-SiO<sub>2</sub> частково підтверджують зроблені

висновки. Внаслідок меншої електроактивності наночастинок  $\text{SiO}_2$ , вдається зменшити вплив додаткової фази на електричні властивості матриці, що проявляється у зменшенні питомої електропровідності при додаванні оксиду кремнію.

Одним з можливих варіантів досягнення зменшення теплопровідності композитних зразків може бути збільшення масової частки нанодисперсної добавки. Згідно [15], для  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , оптимальні значення масової частки нанодобавки становлять 50-60 %. Проте для наших матеріалів максимальні значення вмісту домішки не перевищували 5 %. При вищій концентрації зразки характеризувались високою крихкістю. У випадку використання гарячого пресування дана проблема вирішується, проте, суттєво підвищується агломерації нанодобавок.

Одним з варіантів забезпечення відсутності умов для агломерації наночастинок може бути використання більш високодисперсного порошку базового матеріалу, що забезпечить кращий розподіл наноматеріалу по об'єму зразка. Проте, ефективність використання нанодисперсної добавки при цьому може бути поставлена під сумнів. Це зумовлено тим, що збільшення дисперсності вже призводитиме до росту площі міжзеренних меж, що і визначає ефективність розсіювання фононів. А тип матеріалів, які створюють ці поверхні, як це встановлено у даній роботі і відзначено у [3], не є принципово важливим.

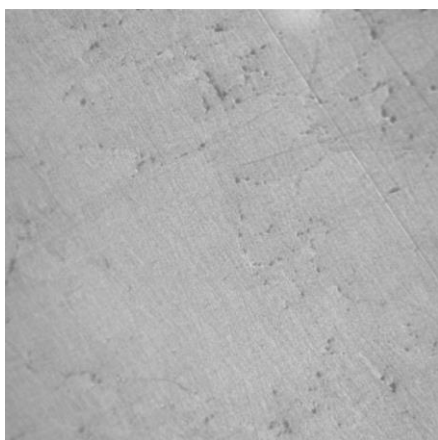
Інший спосіб – створення композитних матеріалів у яких додатковий компонент буде не нано-, а мікродисперсний. Як один з можливих варіантів досліджено зразки  $\text{PbTe}/\text{CdTe}$ .

Телурид кадмію, як і телурид свинцю, отримували методом сплавлення у вакуумованих ампулах з кварцового скла. На відміну від  $\text{PbTe}$ , ампули для синтезу  $\text{CdTe}$  графітували. Отримані злитки  $\text{CdTe}$  подрібнювали і для створення композитних матеріалів відбирали фракції (32-50) мкм. Оптимальний тиск пресування для даних складів - 1,5 ГПа, час витримки під тиском 15 хв, розмір фракцій базового матеріалу – (0,05-0,5)мм. Отримані зразки відпалювали за температури 500 С.

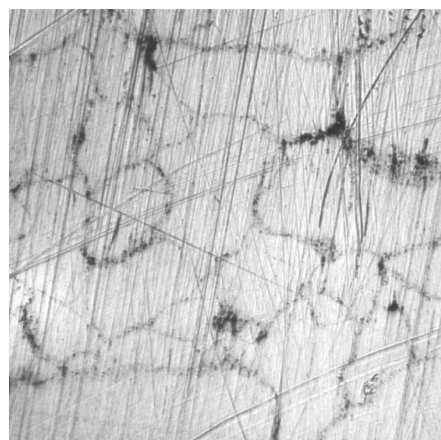
Структура поверхні пресованих зразків  $\text{PbTe}$ -

$\text{CdTe}$  виявилась менш пористою ніж у випадку композитів з нанодисперсними оксидами (рис. 5). Твердість становить  $\text{HV} = 312$  МПа, що, на відміну від, досліджуваних композитів з нанодисперсними добавками, не суттєво відрізняється від бездомішкового  $\text{PbTe}$  –  $\text{HV} = 297$  МПа (тиск пресування 1,5 ГПа, температура відпалу 500 С).

Відомо [24], що вплив  $\text{Cd}$  на електричні властивості  $\text{PbTe}$  слабо виражений. Тому можна припустити, що навіть при дифузії кадмію у телурид свинцю модифікація його електричних властивостей (питомої електропровідності, електронної складової теплопровідності і коефіцієнта термо-ЕРС) буде мінімальною. Експериментально спостережувані залежності  $\sigma(T)$  для зразків  $\text{PbTe}-\text{CdTe}$  підтверджують сказане. Коефіцієнта термо-ЕРС практично не змінюється, а питома електропровідність зразків, на відміну від  $\text{ZnO}$  чи  $\text{TiO}_2$ , зменшується при додаванні  $\text{CdTe}$ . У логарифмічних координатах залежність  $\sigma(T)$  задовільно апроксимується прямою, згідно рівняння  $\lg(\sigma) = A - 2.5 \lg(T)$ . Коефіцієнт 2,5 при цьому вказує на домінування механізму розсіювання носіїв на акустичних фононах. Тобто, наявність домішки не змінює домінуючого механізму розсіювання (порівняно з бездомішковым  $\text{PbTe}$ ). На відміну від досліджуваних нанокompозитів  $\text{PbTe}-\text{ZnO}$  ( $\text{TiO}_2$ ), для зразків  $\text{PbTe}-\text{CdTe}$ , фіксується деяке зменшення коефіцієнту теплопровідності (рис. 6). Тобто, з одного боку, електропровідність зразків і їх теплопровідність зменшується внаслідок додавання мікродисперсного  $\text{CdTe}$ , а з іншого – розсіювання у композитних матеріалах визначається лише взаємодією носіїв струму з акустичними фононами. З огляду на сказане, можна припустити, що відповідальними за зменшення величин  $\sigma$  є не додаткові міжзеренні границі, а зменшення «ефективного поперечного перерізу зразка» (сумарної площі міжзеренних контактів в площині перпендикулярній до напрямку струму), по якому і здійснюється струмоперенесення. У випадку ж фононів, найімовірніше, саме додаткові границі є основним фактором зменшення інтенсивності їх розсіювання.

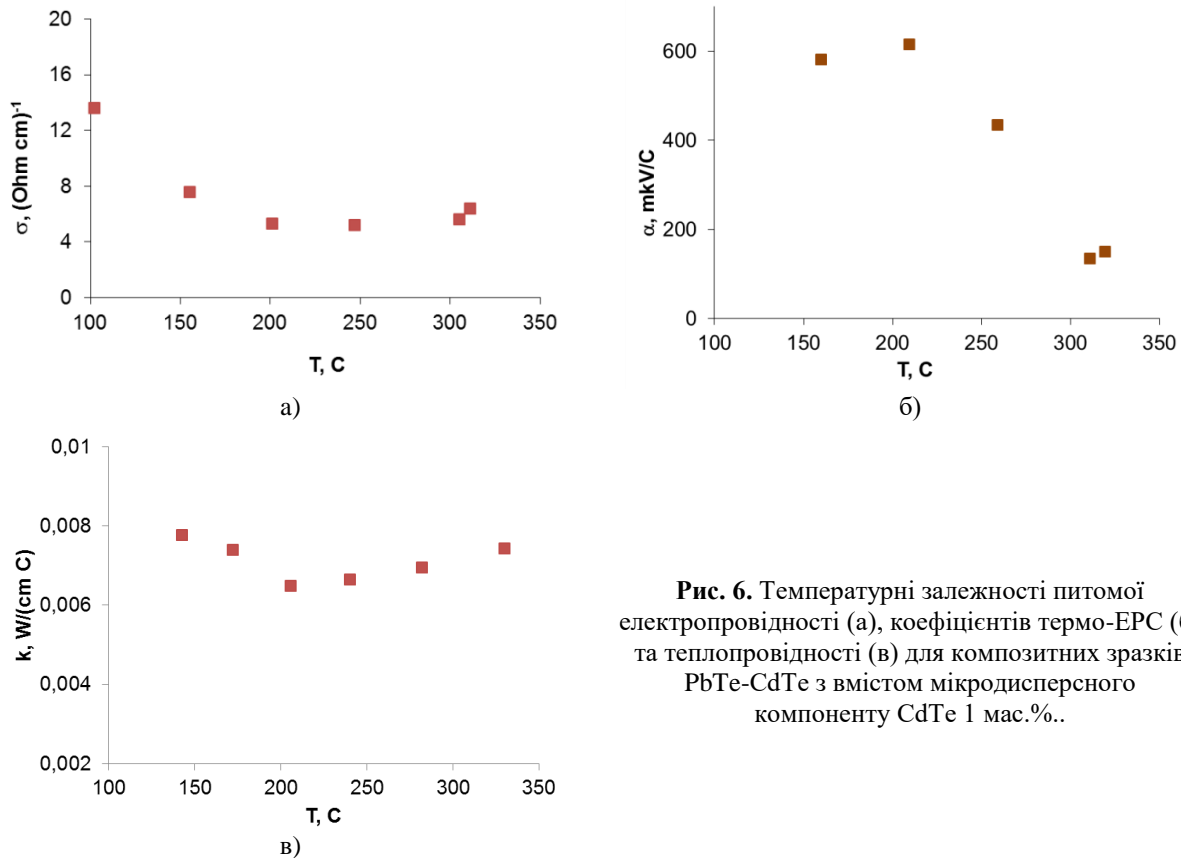


а)



б)

**Рис. 5.** Структура поверхні пресованого та відпаленого за 500 С зразка  $\text{PbTe}$  та композитного зразка  $\text{PbTe}-\text{CdTe}$  ( 1 мас.%  $\text{CdTe}$ ) (розмір фото –  $460 \times 460$  мкм<sup>2</sup>).



**Рис. 6.** Температурні залежності питомої електропровідності (а), коефіцієнтів термо-ЕРС (б) та теплопровідності (в) для композитних зразків PbTe-CdTe з вмістом мікродисперсного компоненту CdTe 1 мас.%. .

## Conclusions

Створення композитних матеріалів на основі PbTe з нанодисперсними добавками, зокрема, ZnO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, з метою досягнення низьких значень коефіцієнта теплопровідності, пов'язане з комплексом труднощів, зумовлених високими температурами отримання та обробки таких матеріалів.

Зокрема, встановлено, що додавання вище зазначених оксидів, зокрема оксиду цинку, змінює величину параметра елементарної комірки базового матеріалу, що може свідчити про хімічну взаємодію компонентів та, зокрема, дифузію компонентів нанодобавки вглиб зерен базового матеріалу.

Також показано, що практичне використання композитних матеріалів на основі сумішей базового матеріалу PbTe та нанодисперсної добавки тугоплавких матеріалів ZnO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> обмежене агломерацією нанодисперсного компоненту при

температурах в області експлуатаційних, що призводить до росту коефіцієнту теплопровідності та, відповідно, зменшення термоелектричної добротності матеріалу.

Можливим способом подолання вказаних труднощів може бути, по перше, використання не нано-, а мікродисперсного додаткового компоненту, а, по друге, добавки необхідно підбирати таким чином, щоб хімічні елементи які входять до її складу, суттєво не впливали на електрофізичні властивості матриці, або цей вплив був мінімізований. Одним з матеріалів, що відповідає таким вимогам, може бути мікродисперсний CdTe.

*Матківський О.М.* – к.ф.-м.н.;

*Маковишин В.І.* – к.ф.-м.н.;

*Купчак Т.І.* – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла;

*Матейк Г.Д.* – к.ф.-м.н., доцент;

*Горічок І.В.* – д.ф.-м.н., професор.

- [1] Zhao Li-Dong, P. Dravid Vinayak, and Mercouri G. Kanatzidis. The panoscopic approach to high performance thermoelectrics. *Energy Environ. Sci.* 7, 251 (2014); <https://doi.org/10.1039/C3EE43099E>.
- [2] Joseph R. Sootsman, Duck Young Chung, and Mercouri G. Kanatzidis. New and Old Concepts in Thermoelectric Materials. *Angew. Chem. Int. Ed.* 48, 8616 (2009); <https://doi.org/10.1002/anie.200900598>.
- [3] A.V. Dmitriev, I.P. Zvyagin. Modern trends in the development of physics of thermoelectric materials. *Advances in Physical Sciences* 180(8), 821 (2010).
- [4] Hongchao Wang, Je-Hyeong Bahk, Chanyoung Kang, Junphil Hwang, Kangmin Kim, Jungwon Kim, Peter Burke, John E. Bowers, Arthur C. Gossard, Ali Shakouri, and Woochul Kim. Right sizes of nano- and microstructures for high-performance and rigid bulk thermoelectrics. *PNAS*, 111(30), 10949 (2014); <https://doi.org/10.1073/pnas.1403601111>.

- [5] L.I. Anatyshuk, Thermoelectricity. V.I. Physics of Thermoelectricity. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 376 (1998).
- [6] Terry M. Tritt, Harald Böttner, Lidong Chen. Thermoelectrics: Direct Solar Thermal Energy Conversion. *MRS Bulletin*. 33, 366 (2008) <https://doi.org/10.1557/mrs2008.73>.
- [7] Jin-cheng Zheng. Recent advances on thermoelectric materials. *Front. Phys. China* 3(3), 269 (2008); <https://doi.org/10.1007/s11467-008-0028-9>.
- [8] A.V. Kuznetsov, S.D. Letyuchenko, V.V. Motskin, Investigation of the relationship between the properties of raw and extruded thermoelectric materials. *Thermoelectricity* 2, 43 (2002).
- [9] M.K. Zhitinskaya, V.I. Kaidanov, S.N. Likov On the features of the electrical conductivity of n-PbTe polycrystals at low temperatures. *Physics and technology of semiconductors* 1, 183 (1978).
- [10] R.Ya. Popilsky., Yu.E. Pivinsky Pressing powder ceramic mass. *Metallurgy* 176 (1983).
- [11] M. Scheele, S.-O. Peters, A. Littig, A. Kornowski, Ch.Klinke, H. Weller, Thermoelectric properties of lead chalcogenide core-shell nanostructures. *Cond. Mat. Sci.* 1-12 (2012); <https://doi.org/10.1021/nm2017183>.
- [12] Martin J., Nolas G.S. Synthesis and characterization of chalcogenide nanocomposites. *Advances in electronic ceramics*. 221 (2008).
- [13] Martin J., Wang Li, Chen L., Nolas G.S. Enhanced Seebeck coefficient through energy-barrier scattering in PbTe nanocomposites. *Phys. Rev. B* 79, 115311 (2009); <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.115311>.
- [14] M.I. Alymov Volumetric consolidated materials. Abstracts of the Open School-Conference of the CIS countries "Ultrafine-grained and nanostructured materials -2010" (Ufa, October 11-15, 2010). Ufa, Bashkir University, 2010. 302 p.
- [15] L.-D. Zhao., B.-P. Zhang, W.-S. Liu, J.-F. Li. Effect of mixed grain sizes on thermoelectric performance of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> compound, *Appl. Phys.* 105, 023704 (2009); <https://doi.org/10.1063/1.3063694>.
- [16] H. Alam, S. Ramakrishna.. A review on the enhancement of figure of merit from bulk to nano-thermoelectric materials. *Nano Energy*. 2013; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.10.005>.
- [17] Chen Zh.-G., Han G., Yang L., Cheng L., Zou J. Nanostructured thermoelectric materials: Current research and future challenge. *Progress in Natural Science: Materials International* 22(6), 535–549 (2012); <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2012.11.011>.
- [18] Pichanusakorn P., Bandaru Pr.. Nanostructured thermoelectrics. *Materials Science and Engineering R*. 67, 19 (2010); <https://doi.org/10.1016/j.mser.2009.10.001>.
- [19] S. Hwang, S.-I. Kim, K. Ahn, J. W. Roh, D.-J. Yang, S.-M. Lee, K.-H. Lee Enhancing the Thermoelectric Properties of p-Type Bulk Bi-Sb-Te Nanocomposites via Solution-Based Metal Nanoparticle decoration. *Journal of Electronic Materials* (2012); <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-012-2280-6>.
- [20] O.B. Sokolov, B.A. Efimova. On crack resistance of semiconductor materials on the example of p-PbTe, *NM* 28(1), 61 (1992).
- [21] I.V. Gorichok, I.M. Lishchynsky, S.I. Mudry, O.S. Oberemok, T.O. Semko, I.M. Khatsevich, O.M. Matkivsky, G.D. Mateik Technological aspects of thermoelectric PbTe production. *Sensor electronics and microsystem technologies* 14(3), 53 (2017).
- [22] I.V. Horichok, M.O. Galushchak, O.M. Matkivskyj, I.P. Yaremij, R.Ya. Yavorskyj, V.S. Blahodyr, O.I. Varunkiv, T.O. Parashchuk; Thermoelectric Properties of Nanostructured Materials Based on Lead Telluride. *Journal of Nano- and Electronic Physics* 9(5), 05022-1 (2017).
- [23] T. Ikeda, V.A. Ravi, L.A. Collins, S.M. Haile, G.J. Snyder. Development and Evolution of Nanostructure in Bulk Thermoelectric Pb-Te-Sb Alloys. *J. Elect. Mat.* 37, 716 (2007); <https://doi.org/10.1007/s11664-007-0175-8>.
- [24] Y. Pei, A. LaLonde, N.A. Heinz, G. J. Snyder, High Thermoelectric Figure of Merit in PbTe Alloys Demonstrated in PbTe-CdTe. *Adv. Energy Mater.* 2, 670 (2015); <https://doi.org/10.1002/aenm.201100770>.

O.M. Matkivskyi<sup>1</sup>, V.I. Makovyshyn<sup>2</sup>, T.I. Kupchak<sup>1</sup>, G.D. Mateik<sup>3</sup>, I.V. Horichok<sup>1</sup>

## Thermoelectric properties of composite materials based on lead telluride

<sup>1</sup>Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, [o.matkivsky@opora.org.ua](mailto:o.matkivsky@opora.org.ua)

<sup>2</sup>Ivano-Frankivsk National Medical University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

<sup>3</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

The study of composite materials based on mechanical mixtures of microdispersed PbTe and nanodispersed additional component ZnO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> (50-70 nm) or microdispersed CdTe (32-50 μm) was performed. The purpose of this study is to reduce the thermal conductivity of the material. Measurements of specific electrical conductivity, Seebeck coefficient and thermal conductivity coefficient of the studied samples were measured. It is established that the achievement of low values of the thermal conductivity is complicated by the processes of agglomeration of the nanodispersed component at the temperatures of production and processing of composite samples, as well as the chemical interaction of the components of the additive and matrix.

**Keywords:** lead telluride, thermoelectric properties, composite materials.