

Рибчаков Д.Є.

Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна
e-mail: anatysh@gmail.com



Рибчаков Д.Є.

КОМП'ЮТЕРНИЙ МЕТОД ОПИСУ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ Bi_2-Te_3 , ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕКСТРУЗІЇ

У даній роботі наводяться результати дослідження літературних джерел в яких описуються технології та властивості термоелектричних матеріалів отриманих методом екструзії. Наводяться результати одного з етапів створення програмного продукту для опису технології отримання та властивостей термоелектричного матеріалу на основі сполук $Bi-Te$. Бібл. 7. рис. 4. табл. 1.

Ключові слова: метод екструзії, екстраполяція, телурид вісмуту.

Вступ

Термоелектричне матеріалознавство є найбільш широким напрямком у термоелектриці, що охоплює такі аспекти, як розробка методів оптимізації параметрів термоелектричних матеріалів (ТЕМ), дослідження властивостей напівпровідників, що традиційно застосовуються в термоелектричному перетворенні, удосконалення технології виготовлення ТЕМ для термоелектричних генераторів, холодильників та приладів вимірювальної техніки, розробка високоточних методів вимірювання та контролю параметрів матеріалів.

Одним з найбільш важливих питань матеріалознавства є все ж таки оптимізація властивостей ТЕМ. Як відомо, термоелектричні матеріали повинні задовольняти ряду вимог, які нерідко суперечать один одному: володіти високими значеннями добротності в широкому інтервалі температур, мати високий коефіцієнт термоЕРС при низьких значеннях коефіцієнтів питомого опору і теплопровідності, характеризуватися високою механічною міцністю. В свою чергу, описані вище механічні та термоелектричні властивості матеріалів залежать від їх структури, складу вихідних компонент, домішок, способу виготовлення.

Як традиційні методи виготовлення сполук телуриду вісмуту існують методи плавки по Бріджмену, Чохральського та методи зонної плавки, а також методи порошкової металургії, такі як гаряче пресування та гаряча екструзія [1].

Метою даної роботи є: дослідження термоелектричних характеристик твердих розчинів на основі телуриду вісмуту отриманих методом екструзії. Застосування модифікованої комп'ютерної програми з дослідженням методу екструзії та характеристик термоелектричних матеріалів на основі сполук $Bi-Te$.

1. Залежність термоелектричних характеристик матеріалів на основі Bi_2-Te_3 отриманих методом екструзії

При отриманні зразків Bi_2Te_3 методом екструзії попередньо сформовані брикети термоелектричного матеріалу продавлюють через прес форму (філь'єру), в процесі чого даний брикет розігрівають до температури нижче температури плавлення [2]. У (таблиці) вказані термоелектричні характеристики матеріалів на основі $Bi-Te$ отримані методом екструзії.

Таблиця

Термоелектричні характеристики матеріалів на основі $Bi-Te$ отримані методом екструзії

Робоча температура, К	$Z, 10^{-3}, K^{-1}$	$\alpha, mV/K$	$\sigma, \Omega m^{-1} cm^{-1}$	$\kappa, W/mK$	Тип матеріалу:	Склад матеріалу:	Температура екструзії, К
280	2.39	225	567	1.2	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
328	2.44	239	512	1.2	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
400	1.75	230	406	1.23	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
475	0.90	200	332	1.47	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
280	2.50	230	525	1.11	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
328	2.50	241	469	1.09	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
400	1.75	236	377	1.2	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
475	0.93	205	295	1.34	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
280	2.96	240	669	1.3	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
328	2.74	247	809	1.8	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
400	2	245	439	1.32	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
475	1.16	206	422	1.55	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
280	2.96	243	627	1.25	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
328	2.89	252	556	1.22	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
400	2.05	250	419	1.28	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
475	1.22	207	421	1.48	P	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	753
294	1.06	191	369	1.27	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	613
294	2.17	229	438	1.06	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	653
294	2.78	237	529	1.07	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	693
294	2.72	241	568	1.21	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	733
294	1.11	176	444	1.24	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	593
294	1.94	177	879	1.42	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	623
294	1.56	194	497	1.41	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	613
294	1.71	197	564	1.29	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	653
294	2.44	215	621	1.18	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	693
294	2.70	225	675	1.27	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	733
294	0.67	145	144	0.46	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	573
294	1.63	207	263	0.69	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	643
294	2.94	231	540	0.98	P	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$	713
300	2.7	150	1844	1.5	P	$(Bi_{0.3}Sb_{0.6})Te_3$	673
350	2.5	170	1423	1.6	P	$(Bi_{0.3}Sb_{0.6})Te_3$	673

Продовження таблиці

Робоча температура, К	$Z, 10^{-3}, K^{-1}$	$\alpha, mV/K$	$\sigma, \Omega m^{-1} cm^{-1}$	$\kappa, W/m \cdot K$	Тип матеріалу:	Склад матеріалу:	Температура екструзії, К
400	2.1	180	1114	1.7	<i>P</i>	$(Bi_{0.3}Sb_{0.6})Te_3$	673
450	1.7	185	934	1.8	<i>P</i>	$(Bi_{0.3}Sb_{0.6})Te_3$	673
300	3.3	200	1083	1.3	<i>P</i>	$(Bi_{0.4}Sb_{0.8})Te_3$	673
350	2.85	215	834	1.35	<i>P</i>	$(Bi_{0.4}Sb_{0.8})Te_3$	673
400	2.4	210	761	1.4	<i>P</i>	$(Bi_{0.4}Sb_{0.8})Te_3$	673
450	1.7	212	573	1.45	<i>P</i>	$(Bi_{0.4}Sb_{0.8})Te_3$	673
300	3.16	250	658	1.3	<i>P</i>	$(Bi_{0.5}Sb_1)Te_3$	673
350	2.28	245	495	1.3	<i>P</i>	$(Bi_{0.5}Sb_1)Te_3$	673
400	1.62	240	366	1.3	<i>P</i>	$(Bi_{0.5}Sb_1)Te_3$	673
450	1	215	281	1.3	<i>P</i>	$(Bi_{0.5}Sb_1)Te_3$	673
240	3.2	193	1350	1.57	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
260	3.28	202	1180	1.47	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
280	3.3	210	1010	1.35	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
300	3.25	220	900	1.34	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
320	3.19	225	800	1.27	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
340	3.05	230	700	1.21	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
360	2.78	235	675	1.34	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
240	2.79	205	1195	1.80	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	673-723
260	2.83	215	1090	1.78	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
280	2.84	220	990	1.69	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
300	2.82	222	900	1.57	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
320	2.7	230	800	1.57	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
340	2.6	231	750	1.54	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
360	2.4	230	700	1.54	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
240	3.18	193	1300	1.52	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
260	3.26	201	1130	1.40	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
280	3.29	205	960	1.23	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
300	3.25	209	850	1.14	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
320	3.18	218	750	1.12	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
340	3.04	220	670	1.07	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
360	2.76	230	650	1.25	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
240	2.74	193	1250	1.70	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	673-723
260	2.78	200	1145	1.65	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
280	2.80	205	1045	1.57	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
300	2.82	207	955	1.45	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
320	2.71	208	855	1.36	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
340	2.62	209	805	1.34	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
360	2.43	210	755	1.37	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
240	3.1	182	1600	1.71	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723

Продовження таблиці

Робоча температура, К	$Z, 10^{-3}, K^{-1}$	$\alpha, mV/K$	$\sigma, \Omega^{-1}cm^{-1}$	$\kappa, W/m\cdot K$	Тип матеріалу:	Склад матеріалу:	Температура екструзії, К
260	3.2	193	1400	1.63	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
280	3.23	195	1200	1.41	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
300	3.25	200	1100	1.35	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
320	3.19	203	1000	1.29	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
340	3.05	205	900	1.24	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
360	2.83	207	800	1.21	<i>P</i>	$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$	673-723
240	2.7	170	1450	1.55	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	673-723
260	2.73	180	1350	1.60	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
280	2.78	185	1250	1.54	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
300	2.8	195	1150	1.56	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
320	2.78	200	1050	1.51	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
340	2.7	203	1000	1.53	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
360	2.6	204	950	1.52	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	723-773
294	2.92	166	1600	1.51	<i>P</i>	$Bi_{0.3}Te_{1.7}Se_3$	-
294	3.25	208	960	1.28	<i>P</i>	$Bi_{0.6}Te_{1.4}Se_3$	-
294	3.2	205	1020	1.34	<i>P</i>	$Bi_{0.6}Te_{1.4}Se_3$	-
294	1.62	296	168	0.91	<i>P</i>	$Bi_{0.6}Te_{1.4}Se_3$	-
294	3	215	1030	1.59	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	-
294	2	295	225	0.98	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	-
294	1.9	245	325	1.03	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.1}Se_{0.9}$	-
294	1.7	240	323	1.09	<i>N</i>	$Bi_2Te_{1.8}Se_{1.2}$	-
300	3.2	208	960	1.30	<i>P</i>	$Bi_{0.6}Te_{1.4}Se_3$	-
300	2.2	260	310	0.95	<i>P</i>	$Bi_{0.6}Te_{1.4}Se_3$	-
300	1.6	295	170	0.92	<i>P</i>	$Bi_{0.6}Te_{1.4}Se_3$	-
300	3.2	205	776	1.02	<i>P</i>	$Bi_{0.6}Te_{1.4}Se_{0.12}Te_{2.88}$	-
300	3.1	213	1055	1.54	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	-
300	2.9	240	655	1.30	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	-
300	2	295	260	1.13	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.82}Se_{0.18}$	-
300	3.2	208	960	1.30	<i>P</i>	$Bi_{0.5}Te_{1.5}Se_3$	-
300	2.92	163	1166	1.06	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	660
300	2.62	171	1059	1.18	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	660
300	2.55	157	1407	1.36	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	660
300	1.40	165	1308	2.53	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	660
300	1.73	175	1197	2.12	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	660
300	1.80	196	1975	2.34	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	660
300	2.03	214	846	1.91	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	660
300	2.10	202	940	1.83	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	660
300	2.50	207	978	1.69	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	660
300	2.33	222	741	1.57	<i>N</i>	$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	660

Всі дані в таблиці були впроваджені в програмний продукт для опису технологій та властивостей термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te*. Оновлення бази даних програмного продукту буде описано в подальших статтях. На основі зібраних даних побудуємо графіки залежності електропровідності, термоЕРС, та добротності від температури рис. 1 – рис 3.

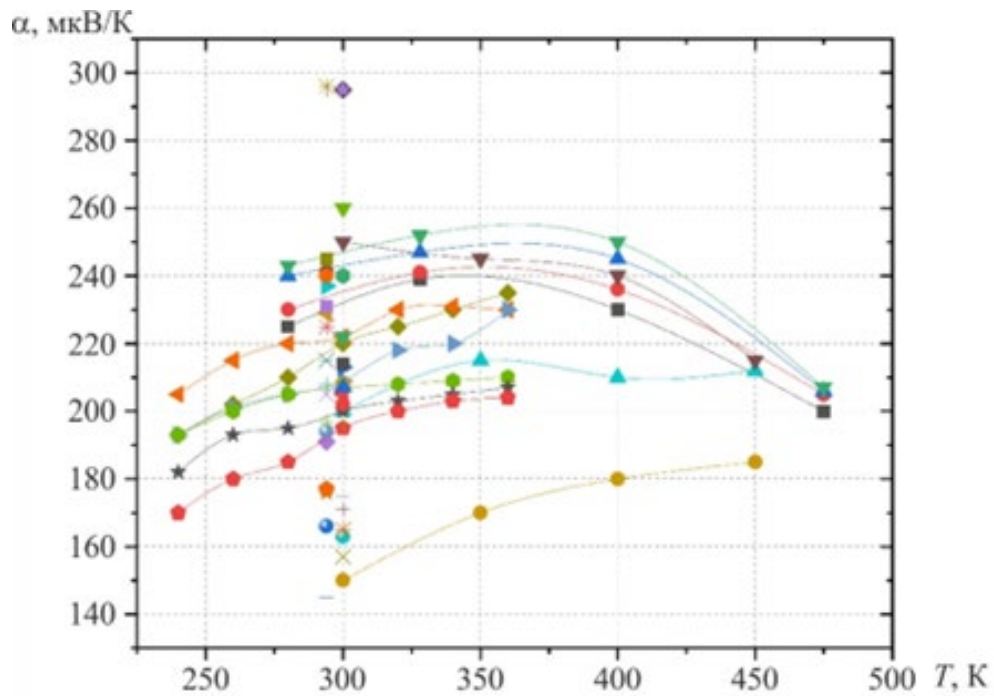


Рис. 1. Графік залежності термоЕРС від температури.

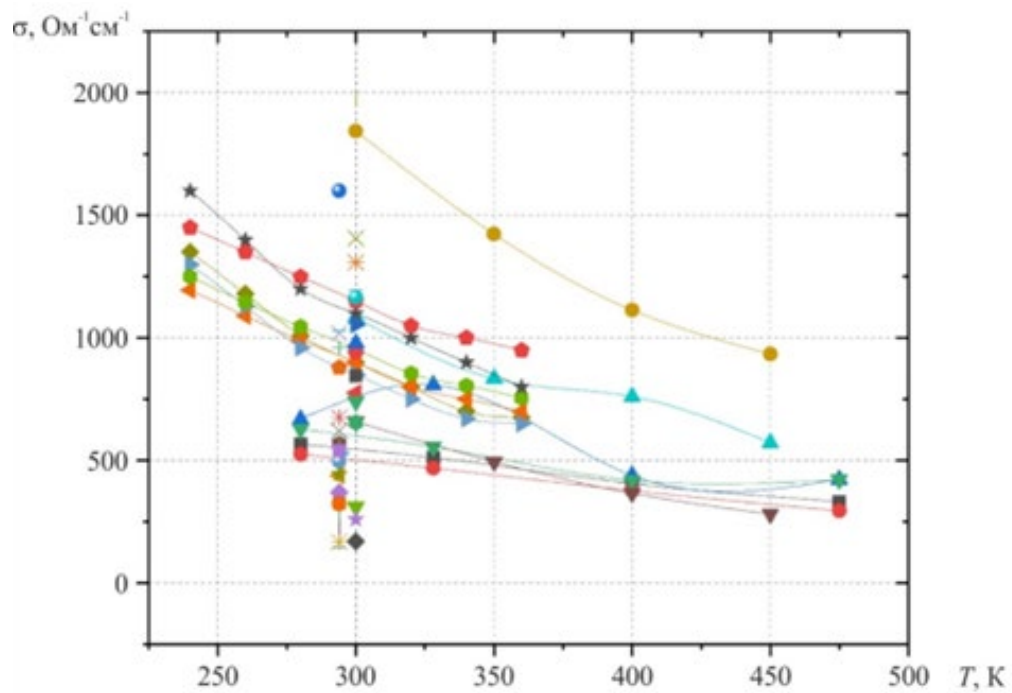


Рис. 2. Графік залежності електропровідності від температури.

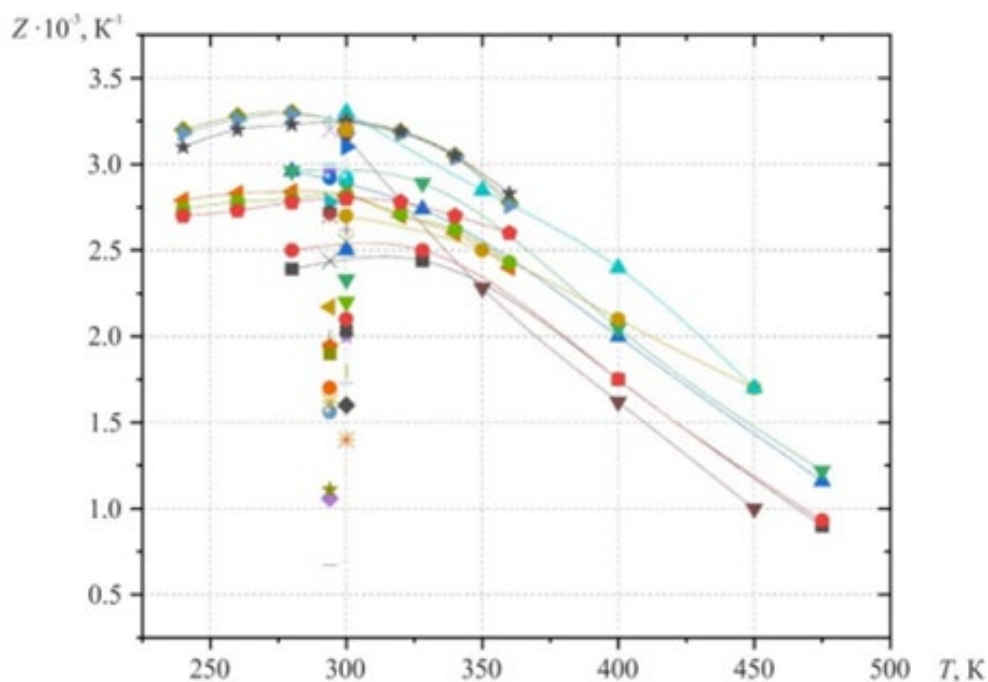


Рис. 3. Графік залежності добротності від температури.

Приведені графіки не тільки наочно демонструють залежності електропровідності, термоЕРС та добротності від температури, а й дозволяють ввести певні обмеження в роботу програми для того щоб, наблизити екстрапольовані значення до реальних.

2. Теорія лінійної екстраполяції

Екстраполяція у загальному розумінні є спосіб обчислення тих чи інших значень за межами відомого діапазону будь-якої досліджуваної величини за набором відомих значень.

Лінійна екстраполяція означає створення дотичної лінії в кінці відомих даних і розширення її за межу. Лінійна екстраполяція забезпечить хороші результати лише тоді, коли використовується для розширення графіку приблизно лінійної функції або не надто далеко за межами відомих даних.

Якщо дві точки даних найближчі до точки екстраполувати і, лінійна екстраполяція обчислюється за формулою 1:

$$Y = Y_0 + ((Y_1 - Y_0) \div (X_1 - X_0)) \times (X - X_0) \quad (1)$$

де X_0 – абсциса першої точки, X_1 – абсциса другої точки, а X – абсциса шуканої точки, тоді Y_0 – ордината першої точки, Y_1 – ордината другої точки, а Y – ордината шуканої точки (що ідентично лінійна інтерполяція якщо $X_{k-1} < X^* < X_k$). Можна включити більше двох точок, і усереднюючи нахил лінійного інтерполянта, на регресія-подібні прийоми, щодо даних, обраних для включення. Це схоже на лінійне передбачення.[14]

Застосування лінійної екстраполяції в даній роботі дозволить прогнозувати поведінку матеріалів таким чином скорочуючи затрати ресурсів та часу на пошук оптимального матеріалу для конкретних завдань.

3. Подальший розвитку програмного продукту для опису технологій та властивостей термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te*.

Наразі в програмний продукт для опису технологій отримання та характеристик термоелектричного матеріалу на основі сполук *Bi-Te*, була впроваджена функція теоретичного прогнозування невідомих значень α та σ за допомогою екстраполяції. Загальний алгоритм роботи даної функції наступний.

- Виклик користувачем функції Екстраполяції.
- Створення динамічної форми, та всіх її компонентів, для проведення екстраполяції.
- Після вводу користувачем необхідної робочої температури, програма здійснює пошук в базі даних матеріалу з найближчим діапазон робочих температур.
- Після підбору оптимального матеріалу програма розраховує значення коефіцієнту α за формулою лінійної екстраполяції.
- На основі отриманого результату програма будує графік залежності α від температури.
- Отримавши результати α програма розраховує значення σ за формулою лінійної екстраполяції.
- На основі отриманого результату програма будує графік залежності σ від температури.
- Отримані результати також виводяться в Label.
- Після завершення роботи користувачем програма видаляє всі компоненти форми та саму форму.

Загальний вигляд вікна екстраполяції значень представлено на рис. 4.

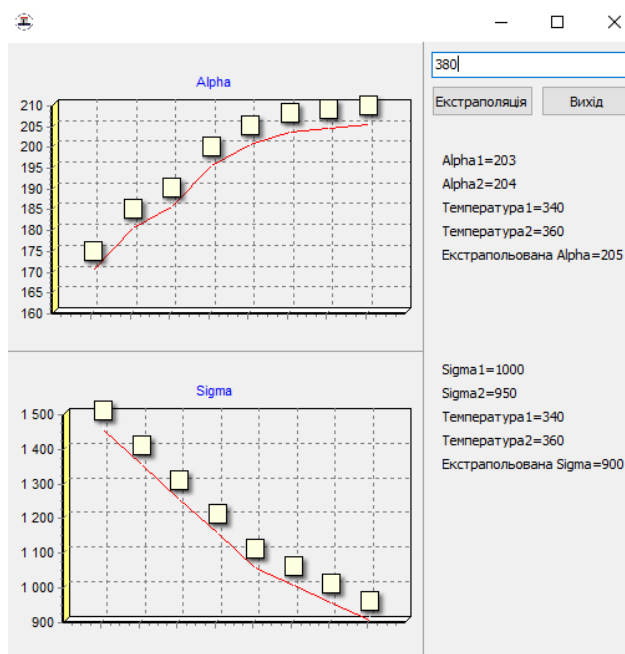


Рис. 4. Загальний вигляд вікна екстраполяції значень.

Подальший розвиток програмного продукту буде описано в майбутніх статтях.

Висновки

1. Проведено дослідження літературних джерел в яких описуються термоелектричні матеріали на основі *Bi-Te* отримані методом екструзії.

2. Дані дослідження були додані до бази даних програмного продукту для опису технологій та властивостей отримання термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te*.
3. Введено функцію екстраполяції в програмний продукт для опису технологій та властивостей отримання термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te*.
4. Подальші версії програмного продукту будуть описані в наступних статтях.

Автор виражає подяку академіку НАНУ Анатичуку Лук'яну Івановичу за запропоновану тему статті.

Література

1. Enrique Maciá "Thermoelectric Materials: Advances and Applications", CRC Press 05/2015, ISBN 9789814463522.
2. Сабо Є.П. Технологія халькогенідних термоелементів. Фізичні засади / Є.П. Сабо // Термоелектрика. – 2006. – № 1. – С. 45 – 66.
3. Fan X.A., Yang J.Y., Zhu W. et al (2008). Preferential orientation and thermoelectric properties of *p*-type $Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$ system alloys by mechanical alloying and equal channel angular extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*, 461, 9 – 13.
4. Park K., Seo J.H., Cho D.C. (2002). Thermoelectric properties of *p*-type Te doped $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ fabricated by powder extrusion. *Materials Science and Engineering*, 103 – 106.
5. Seo J., Cho D., Park K. (2000). Fabrication and thermoelectric properties of *p*-type $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ compounds by ingot extrusion. *Materials Research Bulletin*, 35, 2157 – 2163.
6. Seo J., Lee C., Park K.(1998). Effect of extrusion temperature and dopant on thermoelectric properties for hot-extruded *p*-type Te-doped $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ and *n*-type SbI_3 -doped $Bi_2Te_{2.85}Se_{0.15}$. *Materials Science and Engineering*, 135 – 140.
7. Bongki Min, Sang-Soon Lim, Sung-Jin Jung (2018). Texture-induced reduction in electrical resistivity of *p*-type $(Bi, Sb)_2Te_3$ by a hot extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*, 764, 261 – 266.

Надійшла до редакції:22.02.2023.

Rybchakov D.E.

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatysh@gmail.com

COMPUTER METHOD OF DESCRIPTION OF TECHNOLOGIES AND PROPERTIES OF THERMOELECTRIC Bi_2-Te_3 BASED MATERIAL BY EXTRUSION METHOD

This paper presents the results of a study of literature sources which describe the technology and properties of thermoelectric materials obtained by extrusion method. The result of one of the stages of creating a software product to describe the technologies for obtaining of a thermoelectric materials based on Bi-Te compounds and their properties are presented. Bibl. 7. fig. 5.tab. 1.

Keywords: extrusion method, extrapolation, bismuth telluride.

References

1. Enrique Maciá “Thermoelectric Materials: Advances and Applications”, CRC Press 05/2015, ISBN 9789814463522.
2. Sabo E.P. (2006). Technology of chalcogenide thermoelements. Physical fundamentals. *Thermoelectricity*, 1, 45 – 66.
3. Fan X.A., Yang J.Y., Zhu W. et al (2008). Preferential orientation and thermoelectric properties of *p*-type $Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$ system alloys by mechanical alloying and equal channel angular extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*, 461, 9 – 13.
4. Park K., Seo J.H., Cho D.C. (2002). Thermoelectric properties of *p*-type Te doped $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ fabricated by powder extrusion. *Materials Science and Engineering*, 103 – 106.
5. Seo J., Cho D., Park K. (2000). Fabrication and thermoelectric properties of *p*-type $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ compounds by ingot extrusion. *Materials Research Bulletin*, 35, 2157 – 2163.
6. Seo J., Lee C., Park K.(1998). Effect of extrusion temperature and dopant on thermoelectric properties for hot-extruded *p*-type Te-doped $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ and *n*-type SbI_3 -doped $Bi_2Te_{2.85}Se_{0.15}$. *Materials Science and Engineering*, 135 – 140.
7. Bongki Min, Sang-Soon Lim, Sung-Jin Jung (2018). Texture-induced reduction in electrical resistivity of *p*-type $(Bi, Sb)_2Te_3$ by a hot extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*, 764, 261 – 266.

Submitted: 22.02.2023.