

УДК 537.32



Лисько В.В.

Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

Ніцович О.В., канд. фіз.-мат. наук¹

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

² Чернівецький національний університет імені Юрія
Федьковича,

вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна

e-mail: anatyach@gmail.com



Ніцович О.В.

КОМП'ЮТЕРНА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДУ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ЗОННОЇ ПЛАВКИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛОСКИХ ЗЛИТКІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ Bi_2Te_3

Представлено результати комп'ютерного моделювання процесу виготовлення плоских злитків термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 методом вертикальної зонної плавки. Наведено залежності форми фронту кристалізації від геометричних розмірів нагрівника та холодильників, їх температур, швидкості руху та інших технологічних параметрів. Проведено багатофакторну комп'ютерну оптимізацію технологічних режимів та конструкції обладнання для вирощування плоских злитків термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 . Бібл. 20, рис. 14.

Ключові слова: моделювання, вертикальна зонна плавка, термоелектричний матеріал, телурид вісмуту.

Вступ

Термоелектрика знаходить все більше практичних застосувань у різних галузях. За оцінками [1] ринок термоелектричної продукції на сьогодні складає понад 800 млн. доларів США і щороку зростає орієнтовно на 9%. Випускається понад 55 млн. термоелектричних модулів. При цьому основними при їх виготовленні залишаються термоелектричні матеріали на основі $Bi-Te$.

Особливо перспективними є автономні термоелектричні джерела електрики, що працюють від тепла спалювання довільного палива, і можуть застосовуватись в якості автономних малопотужних джерел електрики для живлення апаратури різного призначення. Вони мають високий ресурс роботи, володіють підвищеною надійністю та стійкістю до кліматичних і ударних навантажень, є універсальними, безшумними в роботі та зручними в експлуатації. Над створенням таких джерел активно працюють вчені та інженери багатьох країн. Термоелектричні генератори електричною потужністю 2 – 20 Вт, що призначені для зарядки мобільних телефонів, MP3-плеєрів, навігаторів під час мандрівок та туристичних походів розроблено рядом закордонних фірм (TES, Power Pot, Biolite) [2-7]. Розроблено також термоелектричні генератори, робота яких заснована на використанні тепла від печей на твердому паливі [8 – 10]. Вони серійно виробляються рядом підприємств [10 – 12]. При цьому, головною перешкодою для їх широкого практичного використання є відносно висока вартість, в першу чергу зумовлена високою вартістю термоелектричного матеріалу, з якого вони виготовлені. Тому вдосконаленню методів отримання термоелектричних матеріалів на основі $Bi-Te$ приділяється багато уваги [13 – 18].

Однією з можливостей зниження вартості матеріалу та зменшення технологічного браку при розрізанні злитків на термоелементи є виготовлення злитків у вигляді плоских стрижнів. Створення технології виготовлення таких злитків вимагає проведення багатопараметричної оптимізації керованих параметрів процесу вирощування.

У роботі [19] наведено результати створення комп'ютерної моделі процесу виготовлення плоских злитків термоелектричних матеріалів методом вертикальної зонної плавки, що є одним із найпоширеніших промислових методів вирощування полікристалічних термоелектричних матеріалів на основі *Bi-Te*.

Метою цієї роботи є багатوافакторна комп'ютерна оптимізація технологічних режимів та конструкції обладнання для виготовлення плоских злитків термоелектричних матеріалів на основі *Bi₂Te₃*.

1. Фізична, математична та комп'ютерна моделі процесу вертикальної зонної плавки

На якість термоелектричного матеріалу, отриманого методом вертикальної зонної плавки, впливають різні фактори, наприклад: коефіцієнт розподілу домішки; довжина розплавленої зони; швидкість руху зони; ступінь перемішування розплавленої зони; температура нагрівача тощо. Основною технологічною характеристикою росту є кривизна фронту кристалізації, що визначається величинами радіального і осевого градієнтів температури в злитку при вирощуванні.

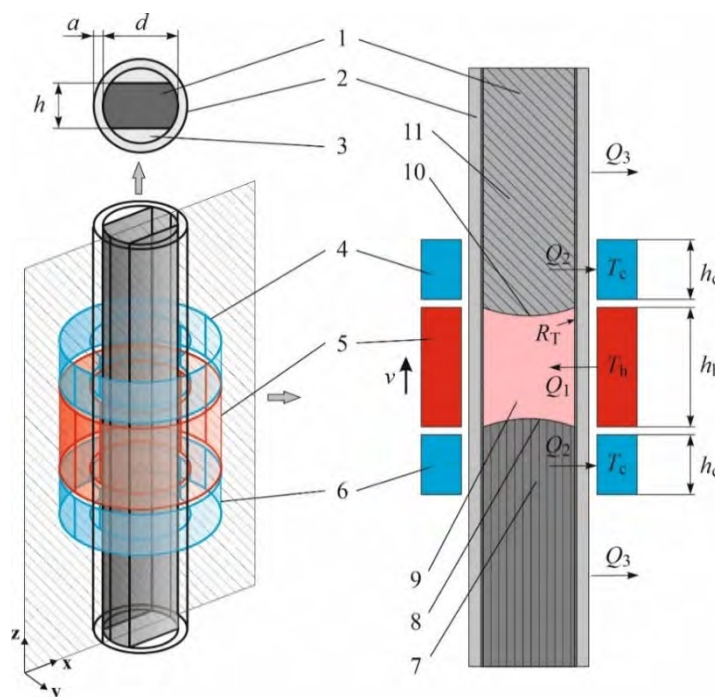


Рис. 1. Фізична модель вирощування термоелектричних матеріалів методом вертикальної зонної плавки: 1 – термоелектричний матеріал; 2 – контейнер; 3 – кварцові вставки; 4, 6 – охолоджувачі; 5 – нагрівник; 7 – матеріал в твердій фазі (структурно орієнтований кристал); 8 – фронт кристалізації; 9 – зона розплаву; 10 – фронт розплаву; 11 – матеріал в твердій фазі (полікристал).

Форма фронту кристалізації може бути опуклою в рідку фазу, плоскою або увігнутою в тверду фазу. Найбільш сприятливим для вирощування монокристалів з низькою щільністю

дефектів є плоский фронт кристалізації. Для створення комп'ютерної моделі процесу вирощування плоских злитків термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 , що дозволяє досліджувати залежності форми фронту кристалізації від різноманітних технологічних параметрів, побудовано фізичну модель, наведену на рис. 1. На рисунку зображено фрагмент злитка, що включає полікристалічний матеріал 11, розплавлену зону 9 та монокристал 7. Злиток поміщено в контейнер 2. За допомогою нагрівника 5 та системи охолоджувачів 4 та 6, формується розплавлена зона 9, яка, переміщуючись разом із нагрівником вздовж злитку, забезпечує плавлення полікристалу та кристалізацію розплаву нижче границі 8, яку називають фронтом кристалізації.

Для комп'ютерного моделювання процесу вирощування термоелектричного матеріалу Bi_2Te_3 використовувався пакет прикладних програм COMSOL Multiphysics [20].

Розподіл температури в досліджуваному зразку знаходиться із вирішення диференціального рівняння теплопровідності, доповненого залежностями фізичних властивостей досліджуваного матеріалу, як функції від фазового стану в даній точці при заданій температурі:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T + \nabla q = Q, \quad (1)$$

$$q = -\kappa \nabla T, \quad (2)$$

$$\rho = \theta \rho_{\text{phase1}} + (1 - \theta) \rho_{\text{phase2}}, \quad (3)$$

$$C_p = \frac{1}{2} \left(\theta \rho_{\text{phase1}} C_{p_{\text{phase1}}} + (1 - \theta) \rho_{\text{phase2}} C_{p_{\text{phase2}}} \right) + L \frac{d\alpha_m}{dT}, \quad (4)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1-\theta)\rho_{\text{phase2}} - \theta\rho_{\text{phase1}}}{\theta\rho_{\text{phase1}} + (1-\theta)\rho_{\text{phase2}}}, \quad (5)$$

$$\kappa = \theta \kappa_{\text{phase1}} + (1 - \theta) \kappa_{\text{phase2}}, \quad (6)$$

де ρ – густина, C_p – теплоємність матеріалу, κ – теплопровідність, u – швидкість руху середовища, яка в досліджуваній задачі рівна нулю, T — температура, θ – співвідношення фаз при даній температурі, α_m – масове відношення між фазами, L – прихована теплота фазового переходу, Q – зовнішній тепловий потік. Індеси *phase1* та *phase2* вказують до якої фази відносяться властивості, тверда фаза чи рідка, відповідно.

При моделюванні зонної плавки розглядався стаціонарний режим, тобто рух теплового вузла, що включає нагрівник та охолоджувачі, не враховувався. Відомо, що кристали на основі телуриду вісмуту вирощують зі швидкістю 1.5 – 2.5 см/год. Оцінивши час, необхідний системі для досягнення теплової рівноваги, було визначено, що за цей час нагрівник зміститься менше ніж на 0.2 мм. Втрати тепла на даній ділянці будуть на два порядки меншими за тепло, що передається від теплового вузла ампулі. Таким чином, цими втратами можна знехтувати при комп'ютерному моделюванні, оскільки вони мало вплинуть на загальний розподіл температур.

Для проведення розрахунків у створеній комп'ютерній моделі задаються геометричні розміри елементів системи, температури нагрівника та охолоджувачів, температури ліквідусу та солідусу термоелектричного матеріалу на основі Bi_2Te_3 , а також температурні залежності властивостей вирощуваного матеріалу.

2. Результати комп'ютерної оптимізації

На рис. 2 наведено приклад форми фронту кристалізації, отриманий моделюванням за описаною вище методикою для випадку плоского злитка товщиною 12 мм при діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висотах нагрівача $h_h = 72$ мм та холодильника $h_c = 24$ мм (висота нагрівача рівна $3d$, холодильника – $1d$), температурі нагрівника $T_h = 760$ °С, температура холодильників $T_c = 30$ °С.

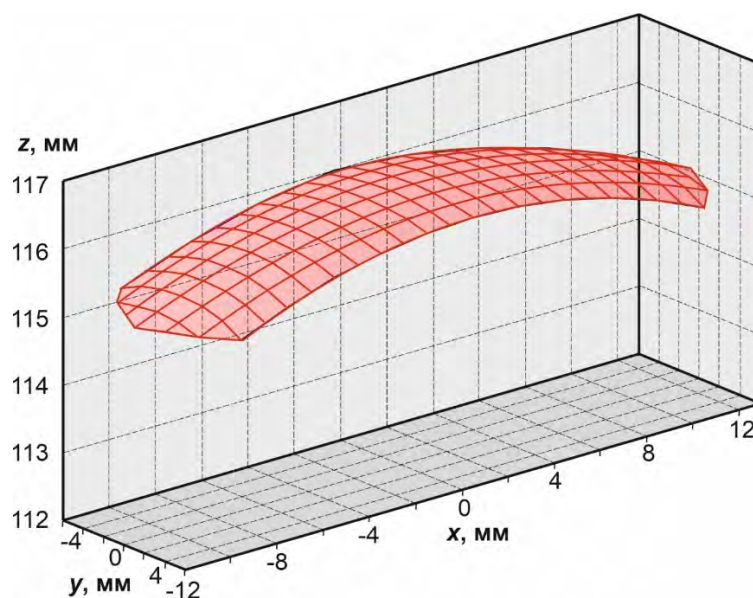


Рис. 2. Приклад форми фронту кристалізації (для плоского злитка товщиною $h = 12$ мм, діаметру контейнера $d = 24$ мм, висот нагрівача $h_h = 72$ мм та холодильника $h_c = 24$ мм, температури нагрівника $T_h = 760$ °С).

Форму фронту кристалізації у перерізах YZ ($x = 0$) та XZ ($y = 0$) при різних розмірах злитку, нагрівника та холодильників, а також різних температурах нагрівника показано на рис. 3 – 13.

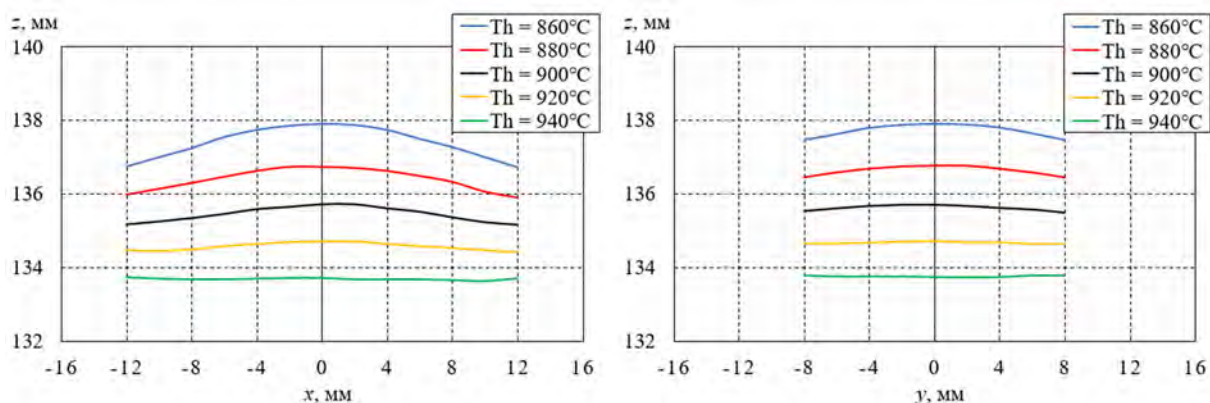


Рис. 3. Форма фронту кристалізації у перерізах XZ ($y = 0$) та YZ ($x = 0$) для різних температур нагрівника T_h (при товщині злитка $h = 16$ мм, діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висоті нагрівача $h_h = 1d = 24$ мм, висоті холодильника $h_c = 1d = 24$ мм).

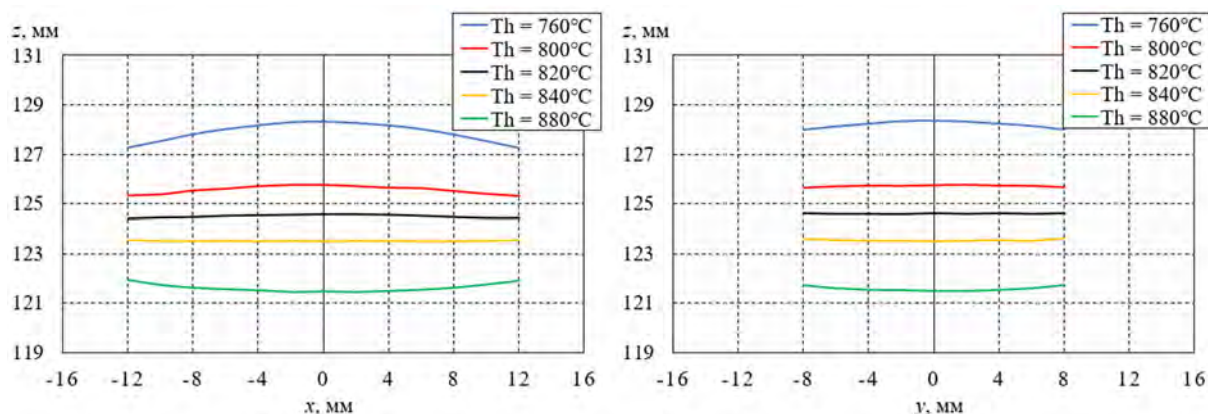


Рис. 4. Форма фронту кристалізації у перерізах XZ ($y = 0$) та YZ ($x = 0$) для різних температур нагрівника T_h (при товщині злитка $h = 16$ мм, діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висоті нагрівача $h_h = 2d = 48$ мм, висоті холодильника $h_c = 1d = 24$ мм).

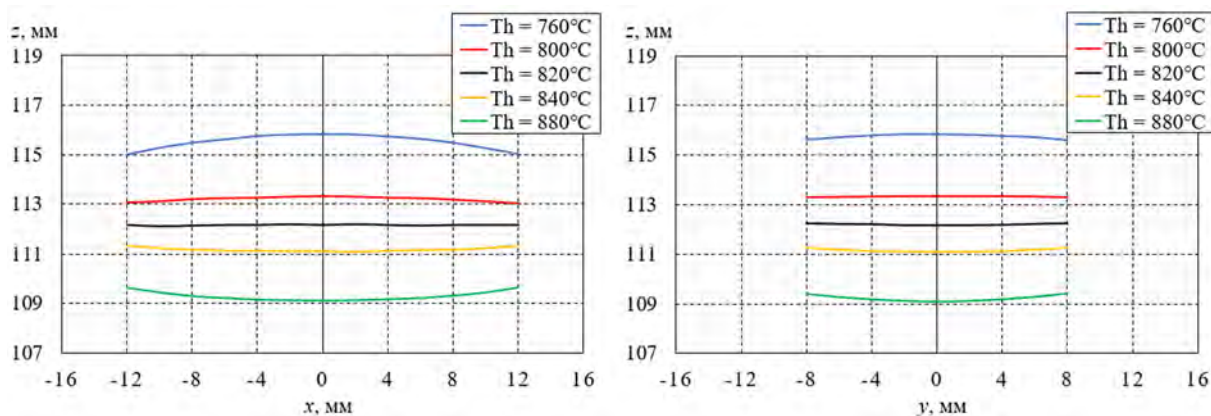


Рис. 5. Форма фронту кристалізації у перерізах XZ ($y = 0$) та YZ ($x = 0$) для різних температур нагрівника T_h (при товщині злитка $h = 16$ мм, діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висоті нагрівача $h_h = 3d = 72$ мм, висоті холодильника $h_c = 1d = 24$ мм).

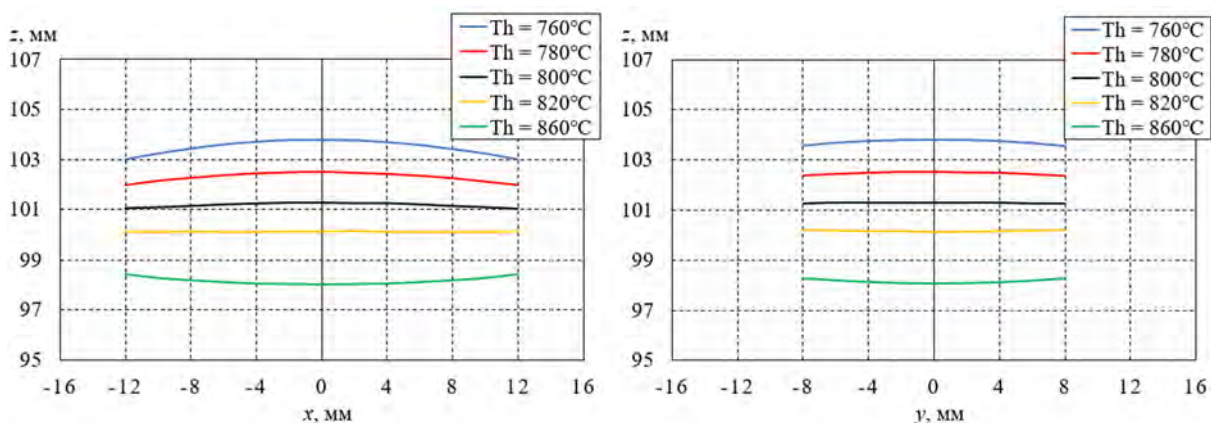


Рис. 6. Форма фронту кристалізації у перерізах XZ ($y = 0$) та YZ ($x = 0$) для різних температур нагрівника T_h (при товщині злитка $h = 16$ мм, діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висоті нагрівача $h_h = 4d = 96$ мм, висоті холодильника $h_c = 1d = 24$ мм).

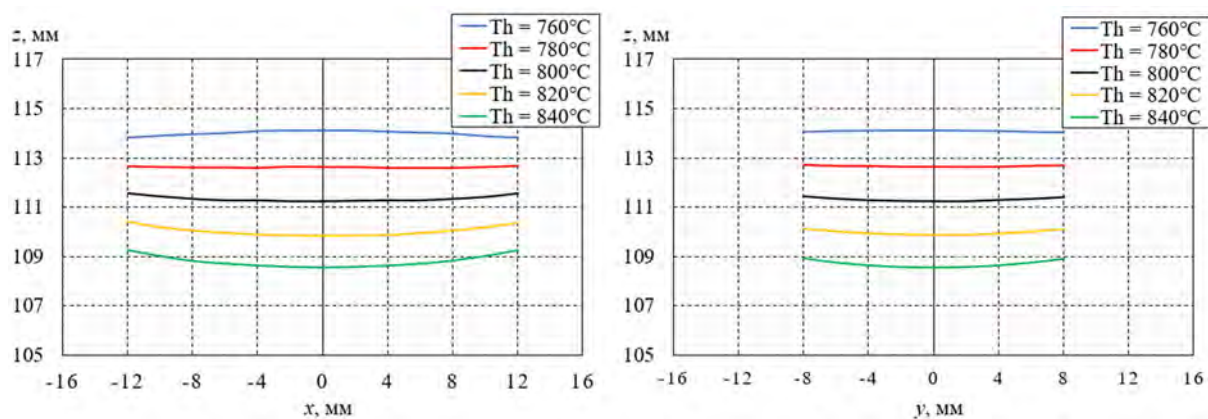


Рис. 7. Форма фронту кристалізації у перерізах XZ ($y = 0$) та YZ ($x = 0$) для різних температур нагрівника T_h (при товщині злитка $h = 16$ мм, діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висоті нагрівача $h_h = 3d = 72$ мм, висоті холодильника $h_c = 0,25d = 6$ мм).

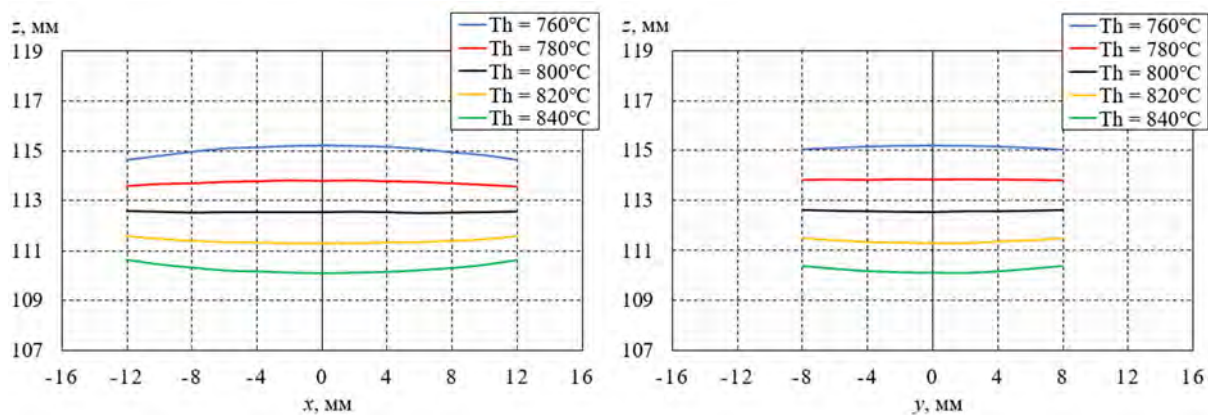


Рис. 8. Форма фронту кристалізації у перерізах XZ ($y = 0$) та YZ ($x = 0$) для різних температур нагрівника T_h (при товщині злитка $h = 16$ мм, діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висоті нагрівача $h_h = 3d = 72$ мм, висоті холодильника $h_c = 0,5d = 12$ мм).

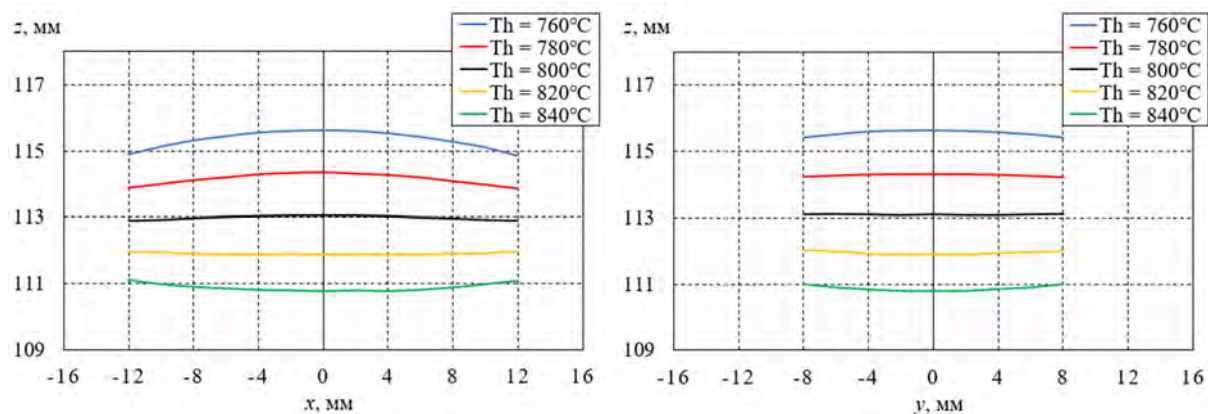


Рис. 9. Форма фронту кристалізації у перерізах XZ ($y = 0$) та YZ ($x = 0$) для різних температур нагрівника T_h (при товщині злитка $h = 16$ мм, діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висоті нагрівача $h_h = 3d = 72$ мм, висоті холодильника $h_c = 0,75d = 18$ мм).

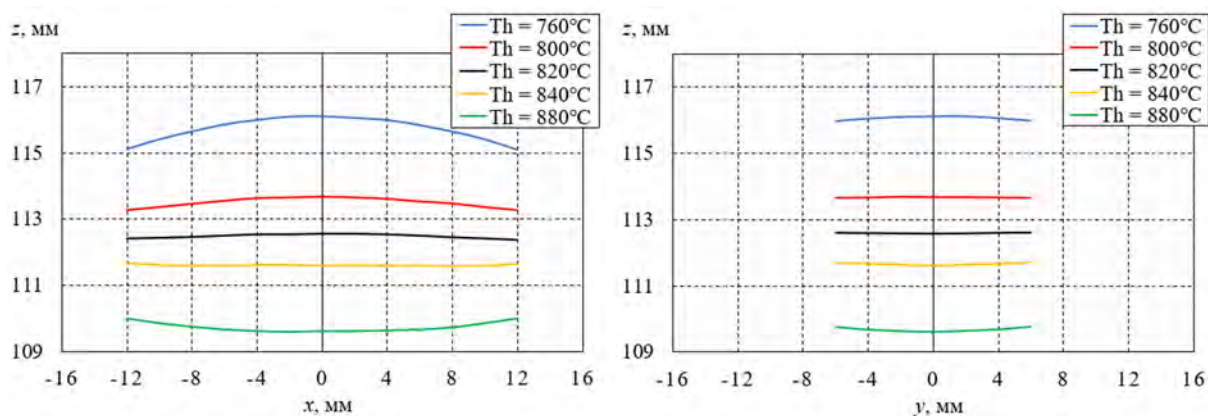


Рис. 10. Форма фронту кристалізації у перерізах XZ ($y = 0$) та YZ ($x = 0$) для різних температур нагрівника T_h (при товщині злитка $h = 12$ мм, діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висоті нагрівача $h_h = 3d = 72$ мм, висоті холодильника $h_c = 1d = 24$ мм).

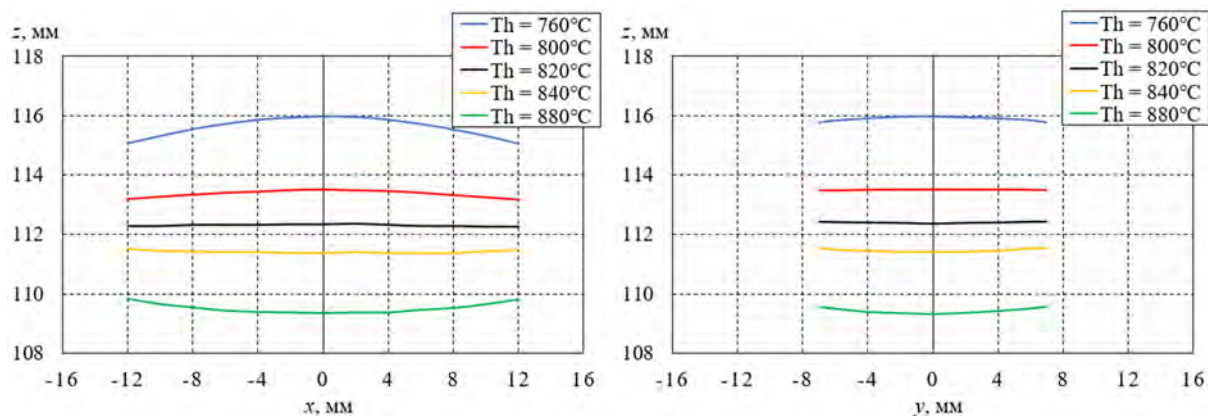


Рис. 11. Форма фронту кристалізації у перерізах XZ ($y = 0$) та YZ ($x = 0$) для різних температур нагрівника T_h (при товщині злитка $h = 14$ мм, діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висоті нагрівача $h_h = 3d = 72$ мм, висоті холодильника $h_c = 1d = 24$ мм).

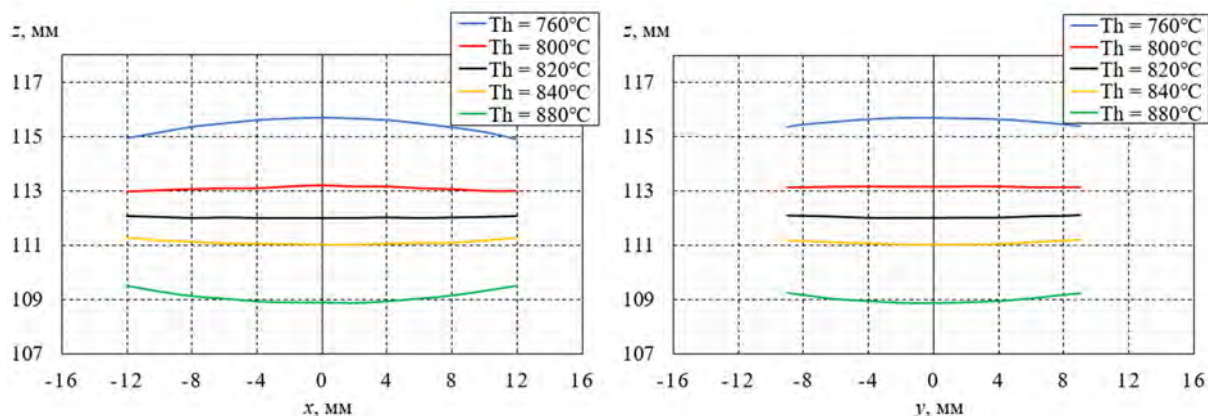


Рис. 12. Форма фронту кристалізації у перерізах XZ ($y = 0$) та YZ ($x = 0$) для різних температур нагрівника T_h (при товщині злитка $h = 18$ мм, діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висоті нагрівача $h_h = 3d = 72$ мм, висоті холодильника $h_c = 1d = 24$ мм).

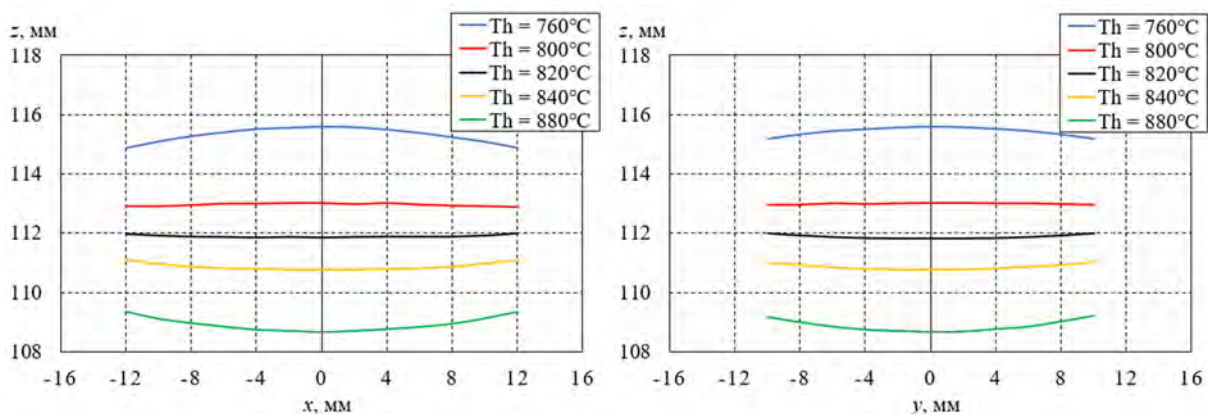


Рис. 13. Форма фронту кристалізації у перерізах XZ ($y = 0$) та YZ ($x = 0$) для різних температур нагрівника T_h (при товщині злитка $h = 20$ мм, діаметрі контейнера $d = 24$ мм, висоті нагрівача $h_h = 3d = 72$ мм, висоті холодильника $h_c = 1d = 24$ мм).

Як видно з рис. 3 – 13, із збільшенням висоти пічки, для заданої температури, фронт кристалізації вирівнюється. Можна також побачити, що при $h_h = 3d$ та $4d$ фронт кристалізації є плоским при однаковій температурі нагрівника 820°C , що оптимальною для вирощування заданого матеріалу, а також зробити висновок, що і $h_h = 3d$ є оптимальним параметром нагрівника. При цьому оптимальною висотою охолоджувачів є $h_c = 1d$.

Також за результатами моделювання було оцінено відсоток виходу матеріалу з покращеною структурою при застосуванні запропонованої технології вирощування плоских злитків в залежності від товщини злитку h (рис. 14). Коефіцієнт K – відношення відсотку матеріалу з покращеною структурою для плоского злитку до відсотку матеріалу з покращеною структурою для круглого злитку при однаковому діаметрі контейнера, умовах вирощування та критерію оцінки одномірності фронту кристалізації.

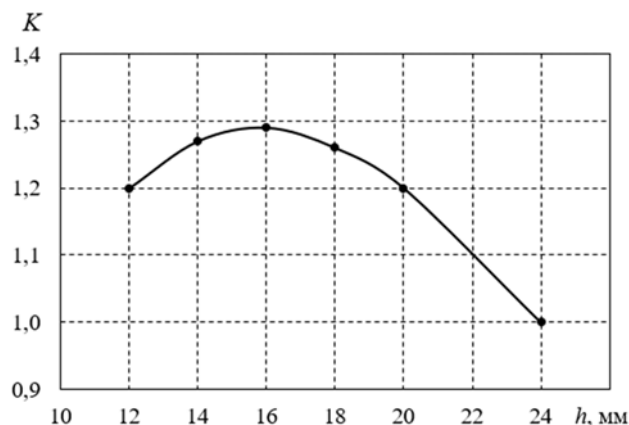


Рис. 14. Залежність коефіцієнту зростання виходу матеріалу з покращеною структурою при вирощуванні плоских злитків в залежності від товщини злитку h .

Отже, при вирощуванні матеріалу у вигляді плоских злитків відсоток виходу матеріалу з покращеною структурою є у 1.2 – 1.3 рази вищим у порівнянні з вирощуванням круглих злитків у контейнері такого ж діаметру. При цьому оптимальною товщиною злитку для контейнера діаметром 24 мм є товщина 15 – 16 мм.

Висновки

1. Представлено результати комп'ютерного моделювання процесу виготовлення плоских злитків термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 методом вертикальної зонної плавки. Наведено залежності форми фронту кристалізації від геометричних розмірів нагрівника та холодильників, їх температур, швидкості руху та інших технологічних параметрів.
2. Визначено оптимальні геометрію контейнера, розміри нагрівача та холодильників, їх температури. Показано, що із збільшенням висоти нагрівника при заданій температурі фронт кристалізації вирівнюється. Встановлено, що при температурі нагрівника 820 °С та холодильників – 30 °С, оптимальна висота нагрівника рівна трьом діаметрам контейнера, а оптимальна висота охолоджувачів – одному діаметру контейнера.
3. Показано, що вирощування термоелектричних матеріалів у вигляді плоских злитків дозволяє підвищити відсоток виходу матеріалу з покращеною структурою у 1.2 – 1.3 рази у порівнянні з круглими злитками для такого ж діаметру контейнера.

Література

1. *Thermoelectric Modules Market – Global Industry Analysis and Forecast (2023-2029)* / MMR PVT. Ltd, 2023. <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/thermoelectric-modules-mar-ket/2622/>.
2. *Pat. CN216524233U*. Thermoelectric water kettle water level detection circuit. Published 13.05.2022.
3. *Pat. CN105167597B*. A kind of thermo-electric generation hot-water bottle. Published 02.01.2018.
4. *Pat. CN209391675U*. A kind of heating vessel. Published. 17.09.2019.
5. *Pat. CN208806757U*. Thermo-electric generation wild cooker. Published. 30.04.2019.
6. *Pat. GB2605345A*. Cooking vessel. Published 28.09.2022.
7. L.I. Anatychuk, V.V. Lysko. (2023). On the design of a trench thermoelectric source of heat and electricity. *J. Thermoelectricity*, 1, 93 – 100.
8. Montecucco A., Siviter J. & Knox A.R. (2017). Combined heat and power system for stoves with thermoelectric generators. *Applied Energy*, Elsevier, vol. 185(P2), 1336-1342. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.132.
9. Żołądek Maciej, Papis Karolina, Kuś Jakub, Zając Michał, Figaj Rafał and Rudykh Kyrylo. (2020). The use of thermoelectric generators with home stoves. *E3S Web Conf.*, 173 (2020) 03005. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017303005>.
10. *Wood stove thermoelectric generator rabbit ears* [Electronic resource] – Retrieved from: <https://thermoelectric-generator.com/product/wood-stove-thermoelectric-generator-rabbit-ears/>.
11. *45-watt teg generator for wood stoves with air-cooling* [Electronic resource] – Retrieved from: <https://www.tegmart.com/thermoelectric-generators/wood-stove-air-cooled-45w-teg>.
12. *Thermoelectric power generator for fireplace heater* [Electronic resource] – Retrieved from: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=828.
13. Cao T., Shi X.L., Li M., Hu B., Chen W., Liu W. Di, Lyu W., MacLeod J., Chen Z.G. (2023). Advances in bismuth-telluride-based thermoelectric devices: progress and challenges. *EScience*, 3(3), Article 100122. <https://doi.org/10.1016/j.esci.2023.100122>.
14. Goldsmid H.J. (2014). Bismuth telluride and its alloys as materials for thermoelectric generation. *Materials*, 7, 2577-2592. <https://doi.org/10.3390/ma7042577>.
15. Tritt T. (2000). *Recent trends in thermoelectric materials research, Part Two* (Semiconductors and

Semimetals, Volume 70). Academic Press. ISBN-13: 978-0127521794.

16. Lysko V.V., Tudoroi P.F. (2019). Computer simulation of extrusion process of Bi_2Te_3 based tape thermoelectric materials. *J. Thermoelectricity*, 2, 58 – 65.
17. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2020). *Thermoelectricity: Vol. 5. Metrology of thermoelectric materials*. Chernivtsi: Bukrek. ISBN 978-617-7770-40-3.
18. Anatychuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. (2012). Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials. *Journal of Electronic Materials*, 41 (6), 1680 – 1685. <https://doi.org/10.1007/s11664-012-1973-1>.
19. Lysko V.V., Nitsovich O.V. (2023). Computer simulation of the process of manufacturing flat ingots of thermoelectric materials based on Bi_2Te_3 by vertical zone melting method. *J. Thermoelectricity*, 3, 18 – 25.
20. COMSOL Multiphysics, v.6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2021.

Надійшла до редакції: 08.11.2023.

Lysko V.V., Cand. Sc (Phys-Math) ^{1,2}

Nitsovich O.V., Cand. Sc. (Phys-Math) ¹

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str.,
Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskyi str.,
Chernivtsi, 58000, Ukraine
e-mail: anatych@gmail.com

COMPUTER OPTIMIZATION OF THE VERTICAL ZONE MELTING METHOD FOR MANUFACTURING FLAT INGOTS OF THERMOELECTRIC MATERIALS BASED ON Bi_2Te_3

The results of computer simulation of the process of manufacturing flat ingots of thermoelectric materials based on Bi_2Te_3 by the method of vertical zone melting are presented. The dependences of the crystallization front shape on the geometric dimensions of the heater and coolers, their temperatures, speed of movement and other process parameters are given. Multifactor computer optimization of process modes and equipment design for growing flat ingots of thermoelectric materials based on Bi_2Te_3 is carried out. Bibl. 20, Figs. 14.

Key words: simulation, vertical zone melting, thermoelectric material, bismuth telluride.

References

1. *Thermoelectric Modules Market – Global Industry Analysis and Forecast (2023-2029)* / MMR PVT. Ltd, 2023. <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/thermoelectric-modules-mar-ket/2622/>.
2. Pat. CN216524233U. Thermoelectric water kettle water level detection circuit. Published 13.05.2022.
3. Pat. CN105167597B. A kind of thermo-electric generation hot-water bottle. Published 02.01.2018.
4. Pat. CN209391675U. A kind of heating vessel. Published. 17.09.2019.
5. Pat. CN208806757U. Thermo-electric generation wild cooker. Published. 30.04.2019.
6. Pat. GB2605345A. Cooking vessel. Published 28.09.2022.

7. L.I. Anatychuk, V.V. Lysko. (2023). On the design of a trench thermoelectric source of heat and electricity. *J. Thermoelectricity*, 1, 93 – 100.
8. Montecucco A., Siviter J. & Knox A.R. (2017). Combined heat and power system for stoves with thermoelectric generators. *Applied Energy*, Elsevier, vol. 185(P2), 1336-1342. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.132.
9. Żołądek Maciej, Papis Karolina, Kuś Jakub, Zając Michał, Figaj Rafał and Rudykh Kyrylo. (2020). The use of thermoelectric generators with home stoves. *E3S Web Conf.*, 173 (2020) 03005. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017303005>.
10. *Wood stove thermoelectric generator rabbit ears* [Electronic resource] – Retrieved from: <https://thermoelectric-generator.com/product/wood-stove-thermoelectric-generator-rabbit-ears/>.
11. *45-watt teg generator for wood stoves with air-cooling* [Electronic resource] – Retrieved from: <https://www.tegmart.com/thermoelectric-generators/wood-stove-air-cooled-45w-teg>.
12. *Thermoelectric power generator for fireplace heater* [Electronic resource] – Retrieved from: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=828.
13. Cao T., Shi X.L., Li M., Hu B., Chen W., Liu W. Di, Lyu W., MacLeod J., Chen Z.G. (2023). Advances in bismuth-telluride-based thermoelectric devices: progress and challenges. *EScience*, 3(3), Article 100122. <https://doi.org/10.1016/j.esci.2023.100122>.
14. Goldsmid H.J. (2014). Bismuth telluride and its alloys as materials for thermoelectric generation. *Materials*, 7, 2577-2592. <https://doi.org/10.3390/ma7042577>.
15. Tritt T. (2000). *Recent trends in thermoelectric materials research, Part Two* (Semiconductors and Semimetals, Volume 70). Academic Press. ISBN-13: 978-0127521794.
16. Lysko V.V., Tudoroi P.F. (2019). Computer simulation of extrusion process of Bi_2Te_3 based tape thermoelectric materials. *J. Thermoelectricity*, 2, 58 – 65.
17. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2020). *Thermoelectricity: Vol. 5. Metrology of thermoelectric materials*. Chernivtsi: Bukrek. ISBN 978-617-7770-40-3.
18. Anatychuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. (2012). Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials. *Journal of Electronic Materials*, 41 (6), 1680 – 1685. <https://doi.org/10.1007/s11664-012-1973-1>.
19. Lysko V.V., Nitsovich O.V. (2023). Computer simulation of the process of manufacturing flat ingots of thermoelectric materials based on Bi_2Te_3 by vertical zone melting method. *J. Thermoelectricity*, 3, 18 – 25.
20. COMSOL Multiphysics, v.6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2021.

Submitted: 08.11.2023.