

ТЕРМОЕЛЕКТРИКА

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Заснований у грудні 1993 р.,
видається 6 разів на рік

№ 2

2020

Редакційна колегія

Головний редактор Л.І. АНАТИЧУК

Л.М. Вихор

Б.І. Стадник

В.В. Лисько

О.Я. Лусте

С.В. Мельничук

О.І. Рогачова

А.О. Снарський

Міжнародна редакційна рада

Л.І. Анатичук, *Україна*

Ю. Грін, *Німеччина*

С.П. Ашмонтас, *Литва*

Т. Кадзікава, *Японія*

Ж.К. Теденак, *Франція*

Т. Трітт, *США*

Х.Дж. Голдсмід, *Австралія*

С.О. Філін, *Польща*

Л. Чен, *Китай*

Д. Шарп, *США*

Т. Кайя, *США*

Ю.Г. Гуревич, *Мексика*

Засновники – Національна академія наук України,
Інститут термоелектрики Національної академії
наук та Міністерства освіти і науки України

Свідоцтво про державну реєстрацію – серія КВ № 15496-4068 ПР

Редактори

В.М. Крамар, П.В. Горський, О.Я. Лусте, Т.Г. Подбегаліна

Схвалено до друку Вченою радою Інституту термоелектрики
Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України

Адреса редакції:

Україна, 58002, м.Чернівці, Головноштамт, а/с 86

Тел. : + (380-372) 90 31 65.

Факс :+(380-3722) 4 19 17

E-mail: jt@inst.cv.ua

<http://www.jt.inst.cv.ua>

Підписано до друку: 26.05.2020 Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк
офсетний. Ум. друк. арк. 11.5. Обл.-вид. арк. 9.2. Наклад 400 прим. Замовлення 4.

Надруковано з оригінал-макету, виготовленого редакцією журналу «Термоелектрика»,
у типографії видавництва “Букрек”,
Україна, 58000, м. Чернівці, вул. Радищева, 10.

© Інститут термоелектрики Національної академії
наук та Міністерства освіти і науки України, 2020

ЗМІСТ

Теорія

Кузь Р.В. Теорія та проектування термоелектричних генераторів, що використовують відходи тепла на транспортних засобах 5

Матеріалознавство

Рогачова О.І., Дорошенко Г.М., Сіпатов О.Ю. Електронні фазові переходи у тонких плівках $Bi_{1-x}Sb_x$ * 13

Конструювання

Годованець Н.А., Константинович І.А., Константинович А.В., Шугані С.Д. Гіротропні термоелементи в однорідному та неоднорідному магнітних полях* 28

Зільке Аугустин, Фреліх Томас, Крапф Гюнтер, Жан-Пьер Бергманн, Гретцель Михаель, Геркен Ян Ансгар, Шмідт Кирил Проблеми виміру температури в процесі ротаційного зварювання тертям* 36

Анатичук Л.І., Кобилянський Р., Федорів Р.В. Комп'ютерне моделювання циклічного температурного впливу на шкіру людини 48

Термоелектричні вироби

Філін С.О. Розрахунок швидкодії термоелектричного охолоджувача напоїв з «мокрими» контактом * 65

Грабов В.М., Демидов Є.В., Комаров В.А., Суслов А.В., Гергега В.А., Єфімов Д.Д. Термоелектричні властивості тонких плівок вісмуту і твердого розчину Вісмут-Сурма* 77

*публікації доповідей на XVIII Міжнародному форумі з термоелектрики

УДК 536



Кузь Р.В.

Кузь Р. В. канд. фіз.-мат. наук

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

ТЕОРІЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ВІДХОДИ ТЕПЛА НА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

У роботі наводяться результати аналізу теоретичних робіт, що стосуються використання термоелектричних генераторів для транспортних засобів з метою отримання додаткової електричної енергії і, відповідно, економії палива. Розглянуто тенденції розвитку і сучасний стан розробки таких генераторів. Бібл. 21.

Ключові слова: термоелектричний генератор, двигун внутрішнього згорання, утилізація тепла.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Застосування термоелектричних генераторів (ТЕГ) для утилізації тепла двигунів внутрішнього згорання з метою отримання електричної енергії протягом останніх трьох десятиріч залишається предметом підвищеного інтересу з боку автомобільної індустрії та спеціалістів, що займаються термоелектрикою.

Метою роботи є аналіз існуючих досягнень у проектуванні та створенні термоелектричних генераторів для автотранспорту і визначення перспектив у розвитку та проектуванні таких генераторів.

Основні теорії проектування ТЕГ для транспортних засобів

Число публікацій, що містять інформацію з теорії проектування і оптимізації термоелектричних генераторів для транспортних засобів становить незначну частину від загального числа робіт, присвячених термоелектричним генераторам для транспортних засобів. Нижче наведено основні результати теоретичних досліджень.

U.S. Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory [1, 2]

Дослідження, виконане Хендріксом і Лустбадером для різного класу вантажівок. Допущення моделі: розглянуто одновимірну модель ТЕГ; температура гарячих вихлопних газів – 700°C. Зроблено спробу оптимізації компонентів системи шляхом врахування контактних теплових і електричних опорів у елементах ТЕГ. Проаналізовано питому вартість термогенератора у залежності від його електричної потужності. Показано, що вона зменшується при збільшенні вихідної потужності ТЕГ завдяки зниженню питомої вартості системи відводу тепла і у розглянутій моделі прямує до величини 10 \$/W.

Інститут ім. Байкова, Росія [3]

Проведено ряд теоретичних робіт, де аналізуються причини неефективності термоелектричного генератора (ТЕГ) для двигуна внутрішнього згорання. Розглядається конфлікт системи «двигун-ТЕГ». Робляться висновки про нульову ефективність ТЕГ зокрема через наявність додаткового зворотнього тиску у системі, додаткової маси та необхідності у додатковій системі охолодження ТЕГ. У розглянутій моделі економічна ефективність ТЕГ є нульовою через зниження ККД самого двигуна при встановленні ТЕГ.

Технологічний університет Chalmers, Швеція [4]

Розглянуто комп'ютерну тривимірну нестационарну модель термоелектричного генератора для дизельного двигуна. В моделі детально розраховуються потоки вихлопного газу в генераторі та потоки охолоджуючої рідини. Пропонується використання даної моделі для оптимізації конструкції теплообмінників, підбору оптимальних термоелектричних матеріалів, визначення впливу генератора на роботу двигуна. У даній роботі про не зроблено висновків економічну ефективність ТЕГ.

Department of Mechanical Engineering, Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ, USA [5]

Метою роботи було визначити вплив наступних параметрів на ефективність ТЕГ: довжини гілок термоелементів, розмірів каналів теплоносіїв, співвідношення електропровідності і теплопровідності матеріалів; чисел Рейнольдса, Нуссельта й Прандтля Re , Nu , Pr ; безрозмірної термоелектричної добротності матеріалів термоелементів ZT .

Використані наближення теорії. Модель одномірна. Потоки тепла уздовж напрямку руху теплоносіїв не враховувалися, фізичні властивості матеріалів передбачалися не залежними від температури. Втрати тепла в елементах конструкції, у комутації, на перехідних термічних опорах не враховувалися. Не враховувалися також втрати в електричній комутації. Масова витрата обох теплоносіїв передбачалася однаковою.

Модель не підтверджена, так як давала розбіжність теоретичних розрахунків і експериментальних вимірів на 40-50%.

Університет North China Electric Power, Китай [6]

Багатопараметрична модель включає гарячий та холодний теплообмінники та термоелектричні модулі. Фактично змодельовані джерело тепла вихлопних газів і водяного охолодження радіатора. Акцент зроблений на нерівномірності різниці температур на термоелектричних блоках уздовж потоку газів.

Зроблено висновки про можливість зменшення об'єму термоелектричного матеріалу при оптимізації конструкції ТЕГ.

Через значні допущення й спрощення отримані результати мало придатні для проектування генераторів. Модель не дає можливості зробити висновки про економічну доцільність генератора.

Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, College Park, USA [7]

У роботі Крейна й Джексона розглянуто схему ТЕГ з перпендикулярними напрямками потоків теплоносіїв у гарячому повітряному й холодному рідинному контурах теплообмінника. Рідинний контур використовує рідину системи охолодження двигуна автомобіля.

Метою роботи була одночасна оптимізація геометрії теплообмінника й термоелектричних модулів. Процедура оптимізації містила: теоретичне моделювання на основі загальновідомих теорій конвективного теплообміну та термоелектричного перетворення енергії; чисельний аналіз, експериментальну перевірку й остаточну оптимізацію на рівні всієї системи за вартістю одиниці електричної потужності.

Використані такі допущення. Площини посередині перегородок між сусідніми каналами є адіабатичними границями для потоків тепла. Це дозволило провести аналіз усього теплообмінника на основі розгляду одного каналу. Тепло Томсона, як і в моделі Бетанкура, приймається нехтовно малим. Фізичні властивості матеріалів не залежні від температури. Ураховувався тільки конвективний теплообмін теплоносіїв з теплообмінником. В енергетичному балансі ТЕГ враховані потужності вентилятора, повітряного контуру й рідинного насоса. Передбачалося, що в термоелектричних модулях використаний матеріал Bi_2Te_3 .

Основні результати роботи. Одномірна модель Бетанкура узагальнена на випадок непаралельних потоків теплоносіїв. Показана можливість одержання питомої потужності 40 Вт/літр гарячої рідини й максимальної вартості 1.1 кВт/\$10000.

Clarkson University, Potsdam, NY, USA [8]. Керрі розробив і досліджував модель ТЕГ, що використовує тепло вихлопних газів. В основу моделі покладене використання модулів Ni-Z 20. Гарячий теплоносій – вихлопні гази, холодний – вода контуру радіатора автомобіля.

Математично модель описується системою чотирьох нелінійних рівнянь, що розв'язуються комп'ютерними засобами. Отримані результати досить точні, однак не дають інформацію щодо оптимізації ТЕГ. Моделювання зводиться до одержання значень, які більш точно можуть бути знайдені експериментальним шляхом. Модель не дає результатів економічної ефективності генератора.

Department of Mechanical Engineering Rochester Institute of Technology Rochester, NY, USA [9]

Моделі Бетанкура, Керрі, Крейна й Джексона були використані й удосконалені в роботі Сміта.

Смітом проаналізовано більш складну схему секційного ТЕГ. Потік гарячого теплоносія створює перепади температур у термоелектричних модулях трьох секцій. У моделі передбачається, що кожна секція має різне число модулів. Такі секційні ТЕГ досліджено з модулями Ni-Z і Melcoг шляхом комп'ютерного моделювання й оптимізації.

Розглянуто 32 комбінації числа секцій (від 1 до 3) і числа модулів у секції. Враховувалися температурні залежності параметрів модулів, задані емпіричними лінійними функціями середньої температури модуля.

Результати моделювання перевірялися експериментально на макеті ТЕГ.

Експерименти відрізнялися від результатів комп'ютерного моделювання на 30-40 %, що знижує цінність такого моделювання. Вартість генератора у даній моделі оцінюється біля 10 \$/W.

Інститут термоелектрики, Україна [10 – 21]

Проведено ряд комплексних досліджень термоелектричних генераторів для автотранспорту, що впливають із опису фізики термоелектричного генератора і дають головне – інформацію для визначення оптимальних моделей термоелектричних генераторів.

Найперші розрахунки виконано на моделі ТЕГ з зосередженими параметрами. Вона дозволяє виявити найбільш загальні закономірності ТЕГ. Ця модель містить локальний теплообмінник нескінченної теплопровідності і з нескінченно великим коефіцієнтом теплообміну. За такої умови газ входить в теплообмінник і залишає його при температурі, яка дорівнює температурі теплообмінника. З теплообмінника тепло переноситься в термоелектричний перетворювач, гаряча температура якого дорівнює температурі газу. Це означає, що в моделі не враховуються втрати тепла при його перенесення з теплообмінника до термоелектричного перетворювача і при передачі тепла від газу до теплообмінника. У термоелектричному перетворювачі тепла енергія частково перетворюється в електричну, а інша частина передається до термостата. Важливим висновком є те, що максимальне значення ККД ТЕГ досягається при певному оптимальному значенні температури теплообмінника, яка складає половину різниці температур гарячого газу і холодного термостата. Це є головний висновок, який дозволяє проводити оптимальне проектування термоелектричного генератора для автомобіля. Виходячи з температур вихлопних газів для різних типів двигунів можна зробити оцінку температури термоелектричного перетворювача. Проаналізувавши середні температури вихлопних газів для бензинового та дизельного двигунів зроблено висновок, що найбільш прийнятна величина температури для бензинового двигуна на гарячій стороні термоелектричного модуля складає всього 300-350°C, а для дизельного двигуна тільки 200-250°C.

Такі результати є зрозумілими, оскільки вони є наслідком двох конкуруючих факторів – покращення ККД модулів при зростанні гарячої температури та зменшення ККД при збільшенні теплової потужності, що проходить через ТЕГ внаслідок спаду гарячої температури.

Отримані результати спростовують загальноприйнятну думку про те, що в автомобільних термоелектричних генераторах слід використовувати високотемпературні матеріали, а також обмежують перелік матеріалів, відомих у даний час, придатних для використання в автомобільних термоелектричних генераторах.

Наступним важливим кроком є аналіз секційних генераторів. У такій моделі секції послідовно відбирають тепло від вихлопного газу. Секції оптимізовані по температурних умовах та конкретних використаних матеріалах у секціях. З аналізу такої моделі отримано наступну важливу інформацію: кількість секцій раціонально застосовувати не більше трьох; використання секцій може збільшити ефективність ТЕГ в 1.3 – 1.4 рази. Тому використання секцій має бути предметом аналізу в кожному конкретному випадку, оскільки секційний генератор набагато складніший по конструкції, і, відповідно, дорожчий.

Неведені вище результати відносяться до стаціонарного режиму роботи ТЕГ, коли вихлопний газ стабільний по температурі та тепловій потужності. Насправді в автомобілях в реальних режимах експлуатації ці умови не виконуються. Ще одним важливим результатом, отриманим в Інституті термоелектрики, є аналіз роботи ТЕГ у нестационарних режимах роботи. Комп'ютерне моделювання реальних теплових умов показує, що усереднена потужність генераторів орієнтовно у 4 рази нижча по відношенню до максимальної.

Висновки

1. Проектування автомобільних термоелектричних генераторів у більшості випадків є емпіричним. Проектування засноване на переборі різних варіантів компонентів моделі з метою знаходження найкращого. Однак, такі підходи не виявляють загальних

закономірностей, якими описуються ТЕГ, що знижує можливості знаходження оптимальних конструкцій.

2. Усі теоретичні моделі розрахунку потужності ТЕГ для транспортних засобів дають похибку біля 30-40 %, що змушує шукати нові підходи до проектування таких ТЕГ.
3. Питома вартість ТЕГ для транспортних засобів до цього часу залишається високою. Надія на їх впровадження залишається тільки за умови значного їх здешевлення.
4. Необхідним є комплексний підхід до проектування термоелектричного генератора, який буде

Література

1. T. J. Hendricks and J. A. Lustbader, "Advanced Thermoelectric Power System Investigations for Light-Duty and Heavy Duty Applications: Part 1," in 21st International Conference on Thermoelectrics, 2002, pp. 381-386.
2. T. J. Hendricks, "Optimum Design Parameters in Two-Stage Thermoelectric Generators, " Proceedings of 23rd Intersociety Energy Conversion and Engineering Conference, Denver, CO, Vol. 1, pp. 339-345, 1988.
3. М.А. Korzhuev, Т.Е. Svechnikova. Thermodynamic restrictions for the net power of automotive thermoelectric generators and prospects of their use in transport // Journal of Thermoelectricity №3, 2013.
4. Olle Hugblom, Ronnie Andersson. CFD Modeling of Thermoelectric Generators in Automotive EGR-coolers. // 9th European Conference on Thermoelectrics AIP Conf. Proc. 1449, 497-500 (2012); doi: 10.1063/1.4731602.
5. A. Bethancourt, R. Echigo, and H. Yoshida, "Thermoelectric Conversion Analysis in a Counter-flow Heat Exchanger," AIP Conference Proceedings, vol. 316, pp. 299-304, 1995.
6. Jing-Hui Meng, Xiao-Dong Wang, Wei-Hsin Chen. Performance investigation and design optimization of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery // Energy Conversion and Management 120 (2016) 71–80.
7. D. T. Crane and G. S. Jackson, "Optimization of cross flow heat exchangers for thermoelectric waste heat recovery," Energy Conversion and Management, vol. 45, pp. 1565-82, 06 2004.
8. M. Karri, "Modeling of an Automotive Exhaust Thermoelectric Generator," in Mechanical Engineering. vol. Masters of Science Potsdam, NY: Clarkson University, 2005, p. 163.
9. Kevin D. Smith. An Investigation into the Viability of Heat Sources for Thermoelectric Power Generation Systems: Thesis for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering: February 2009. Department of Mechanical Engineering Rochester Institute of Technology.
10. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Kuz R.V. Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles // Journal of Electronic Materials, Vol. 40, Issue 5, 2011.
11. L.I. Anatyshuk and R.V. Kuz, Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. Thermoelectrics goes automotive. (Berlin: Expert Verlag, 2011).
12. L.I. Anatyshuk and R.V.Kuz, Materials for vehicular thermoelectric generators. Journal of Electronic Materials, Volume 41, Number 6 (2012).
13. Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер. Ефективність термоелектричних рекуператорів тепла вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання // Термоелектрика, №4. - 2011. - С. 78-83.
14. Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер. Термоелектричний генератор для бензинового двигуна // Термоелектрика, №2. - 2012. - С. 93-100.

15. Кузь Р.В. Система мониторинга параметров движущегося автомобиля // Термоэлектричество, №4. - 2012. - С. 89-94.
16. Анагичук Л.І., Кузь Р.В. Вплив повітряного охолодження на ефективність термоелектричного генератора дизельного автомобіля // Термоелектрика, №2. - 2014. - С. 60-67.
17. Анагичук Л.І., Кузь Р.В. Вплив повітряного охолодження на ефективність термоелектричного генератора автомобіля з бензиновим двигуном // Термоелектрика, №3. - 2014. - С. 87-91.
18. Анагичук Л.І., Кузь Р.В. Вплив повітряного охолодження на ефективність секційного термоелектричного генератора для автомобіля з дизельним двигуном // Термоелектрика, №4. - 2014. - С. 81-87.
19. Анагичук Л.І., Кузь Р.В. Вплив повітряного охолодження на ефективність секційного термоелектричного генератора для автомобіля з бензиновим двигуном // Термоелектрика, №5. - 2014. - С. 49-54.
20. L.I. Anatyshuk, R.V. Kuz. / Materials Today: Proceedings 2 (2015) 871 - 876 / Materials Today: Proceedings 2 (2015) 871 - 876. (ECT-2014), Madrid.
21. Анагичук Л.І., Кузь Р.В. Термоелектричний генератор для вантажівок // Термоелектрика, №3. - 2016. - С. 5-10.

Надійшла до редакції 01.04.2020

Кузь Р.В. канд. физ.-мат. наук

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatysh@gmail.com

ТЕОРИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ОТХОДЫ ТЕПЛА НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

В работе приводятся результаты анализа теоретических работ, касающихся использования термоэлектрических генераторов для транспортных средств с целью получения дополнительной электрической энергии и, соответственно, экономии топлива. Рассмотрены тенденции развития и современное состояние разработки таких генераторов. Библ. 21.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, двигатель внутреннего сгорания, утилизация тепла.

Kuz R.V. cand. phys. - math. Sciences

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

THEORY AND DESIGN OF THERMOELECTRIC GENERATORS USING WASTE HEAT ON VEHICLES

The paper presents the results of the analysis of theoretical works concerning the use of thermoelectric generators for vehicles in order to obtain additional electricity and, accordingly, fuel saving. The trends and current state of development of such generators are considered. Bibl. 29.

Key words: thermoelectric generator, internal combustion engine, heat recovery.

References

1. Hendricks T.J. and Lustbader J.A. (2002). Advanced thermoelectric power system investigations for light-duty and heavy duty applications: Part 1," in *21st International Conference on Thermoelectrics*, 381-386.
2. Hendricks T.J. (1988). Optimum design parameters in two-stage thermoelectric generators. *Proc. 23rd Intersociety Energy Conversion and Engineering Conference* (Denver, CO), Vol. 1, 339-345.
3. Korzhuev M.A., Svechnikova T.E. (2013). Thermodynamic restrictions for the net power of automotive thermoelectric generators and prospects of their use in transport. *J. Thermoelectricity*, 3.
4. Hugblom Olle, Andersson Ronnie (2012). CFD modeling of thermoelectric generators in automotive EGR-coolers. *9th European Conference on Thermoelectrics AIP Conf. Proc.* 1449, 497-500; doi: 10.1063/1.4731602.
5. Bethancourt A., Echigo R., and Yoshida H. (1995). Thermoelectric conversion analysis in a counter-flow heat exchanger. *AIP Conference Proc.*, vol. 316, 299-304.
6. Mewng Jing-Hui, Wang Xiao-Dong, Chen Wei-Hsin (2016). Performance investigation and design optimization of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 120, 71-80.
7. Crane D.T. and Jackson G.S. (2004). Optimization of cross flow heat exchangers for thermoelectric waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 45, 1565-82.
8. Karri M.M. (2005). Modeling of an automotive exhaust thermoelectric generator. *Mechanical Engineering. vol. Masters of Science Potsdam*. NY: Clarkson University.
9. Kevin D. Smith (2009). An investigation into the viability of heat sources for thermoelectric power generation systems: *Thesis for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering*. Department of Mechanical Engineering Rochester Institute of Technology.
10. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Kuz R.V. (2011). Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles. *J. Electronic Materials*, 40(5).
11. Anatyshuk L.I. and Kuz R.V. (2011). Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. *Thermoelectrics goes automotive*. (Berlin: Expert Verlag, 2011).
12. Anatyshuk L.I. and Kuz R.V. (2012). Materials for vehicular thermoelectric generators. *J. Electronic Materials*, 41 (6).
13. Анатичук L.I., Kuz R.V. Rozver Yu.Yu (2011). Efficiency of thermoelectric recuperators of exhaust gas heat from internal combustion engines. *J. Thermoelectricity*, 4, 78-83.
14. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. (2012). Thermoelectric generator for petrol engine. *J. Thermoelectricity*, 2, 93-100.
15. Kuz R.V. (2012). Moving vehicle parameters monitoring system. *J. Thermoelectricity*, 4, 89-94.
16. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of thermoelectric generator in a diesel engine car. *J. Thermoelectricity*, 2, 60-67.
17. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of thermoelectric

- generator in a car with a petrol engine. *J.Thermoelectricity*, 3, 87-91.
18. Anatyчук L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of sectional thermoelectric generator in a car with a diesel engine. *J.Thermoelectricity*, 4, 81-87.
 19. Anatyчук L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of sectional thermoelectric generator for a car with a petrol engine. *J.Thermoelectricity*, 5, 49-54.
 20. Anatyчук L.I., Kuz R.V. Materials Today: Proceedings 2 (2015) 871 - 876 (*ECT-2014*), Madrid.
 21. Anatyчук L.I., Kuz R.V. (2016). Thermoelectric generator for trucks. *J.Thermoelectricity*, 3, 5-10.

Submitted 01.04.2020

УДК 537.32; 537.323; 538.9 539.23

Рогачова О.І., докт. фіз.-мат. наук, професор
Дорошенко Г.М.,
Сіпатов О.Ю. докт. фіз.-мат. наук, професор

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
вул. Кирпичова, 2, м. Харків 61002, Україна,
e-mail: rogachova.olena@gmail.com

ЕЛЕКТРОННІ ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ У ТОНКИХ ПЛІВКАХ $Bi_{1-x}Sb_x$

Метою даної роботи було вивчення концентраційних залежностей ТЕ та гальваномагнітних властивостей тонких плівок $Bi_{1-x}Sb_x$ в інтервалі $x = 0 - 0.25$. Тонкі плівки $Bi_{1-x}Sb_x$ товщиною $d = (250 \pm 10)$ нм були виготовлені термічним випаровуванням у вакуумі кристалів $Bi_{1-x}Sb_x$ на (111) слюдяні підкладки, а транспортні властивості (електропровідність, коефіцієнт Зеєбека, коефіцієнт Холла, рухливість електронів і дірок, магнетоопір) плівок вимірювались за кімнатної температури. Було встановлено, що всі аномалії на концентраційних залежностях властивостей, що спостерігалися раніше в масивних кристалах $Bi_{1-x}Sb_x$ і пов'язувалися із електронними фазовими переходами, відтворювались у тонких плівках. Отримані дані, з одного боку, – це ще один доказ існування концентраційних особливостей у транспортних властивостях твердих розчинів $Bi_{1-x}Sb_x$, а, з другого боку, ці дані вказують на добру відповідність складів вихідних кристалів складам тонких плівок. Одержані результати слід враховувати при інтерпретації результатів досліджень та прогнозуванні властивостей кристалів і тонких плівок $Bi_{1-x}Sb_x$. Бібл. 32, рис. 4.

Ключові слова: $Bi_{1-x}Sb_x$, твердий розчин, тонка плівка; концентрація, фазовий перехід, термоелектричні властивості, гальваномагнітні властивості.

Вступ

Тверді розчини $Bi_{1-x}Sb_x$ привертають увагу як перспективні низькотемпературні термоелектричні (ТЕ) матеріали n -типу для холодильних пристроїв при температурах нижче ~ 200 К [1 – 3]. Крім того, ці матеріали належать до фізичних об'єктів, чий унікальні властивості з кожним роком продовжують виявлятися все більше і більше, дивуючи нас новими фізичними ефектами. Останнім часом інтерес до вивчення кристалів і тонких плівок різко зріс після того, як було встановлено, що вони проявляють властивості 3D-топологічних ізоляторів [4, 5], в яких сильна спин-орбітальна взаємодія призводить до появи топологічно захищених металевих поверхневих станів із діраківським законом дисперсії. Однак до теперішнього часу одночасне співіснування топологічних і добрих ТЕ властивостей, що спостерігається також для інших перспективних ТЕ матеріалів (наприклад, сполук V_2VI_3), не знайшло однозначного пояснення, але за останні роки з'явився ряд робіт, в яких говориться про можливий вплив топологічних поверхневих станів на ТЕ властивості кристалів і тонких плівок $Bi_{1-x}Sb_x$ [6, 7].

Через структурну та електрохімічну подібність напівметалів Bi та Sb ці елементи утворюють безперервний ряд твердих розчинів $Bi_{1-x}Sb_x$ [8], що дає змогу детально вивчити вплив

складу на кристалічну і зонну структуру та фізичні властивості. Відомо, що хоча тверді розчини $Bi_{1-x}Sb_x$ мають ромбоєдричну кристалічну структуру у всьому інтервалі концентрацій, зонна структура змінюється із складом немонотонно [9 – 12] (рис. 1). У валентній зоні чистого Bi є підзони "легких" (L_a) і "важких" (T) дірок, і, як результат перекриття діркової T та електронної L_s зон, Bi виявляє напівметалеві властивості. Зі збільшенням концентрації Sb відстань між зоною провідності L_s і підзоною L_a зменшується і при $x = 0.023 - 0.04$ (різні автори вказують різні значення цієї концентрації) спостерігається безщільний стан і має місце інверсія зон L_s і L_a . З подальшим збільшенням x відстань між цими зонами знову збільшується. Одночасно зі збільшенням x перекриття зон T і L_s зменшується, зникаючи при $x = 0.06 \div 0.07$, коли відбувається перехід напівметал – непрямозонний напівпровідник. При $x = 0.08 \div 0.09$ стелі T і L_s валентних зон збігаються і в діапазоні концентрацій $x \cong 0.09 - 0.15$ напівпровідник стає прямозонним. Максимальне значення енергетичного зазору в напівпровідниковій області (~ 0.025 еВ) досягається поблизу $x = 0.15 \div 0.17$. При подальшому збільшенні x , при $x \sim 0.5$ напівпровідник знову стає непрямозонним і при $x > 0.22$ тверді розчини $Bi_{1-x}Sb_x$ набувають напівметалевих властивостей. Таким чином, система $Bi_{1-x}Sb_x$ характеризується низкою електронних фазових переходів, наявність яких повинна відобразитися на концентраційних залежностях властивостей.

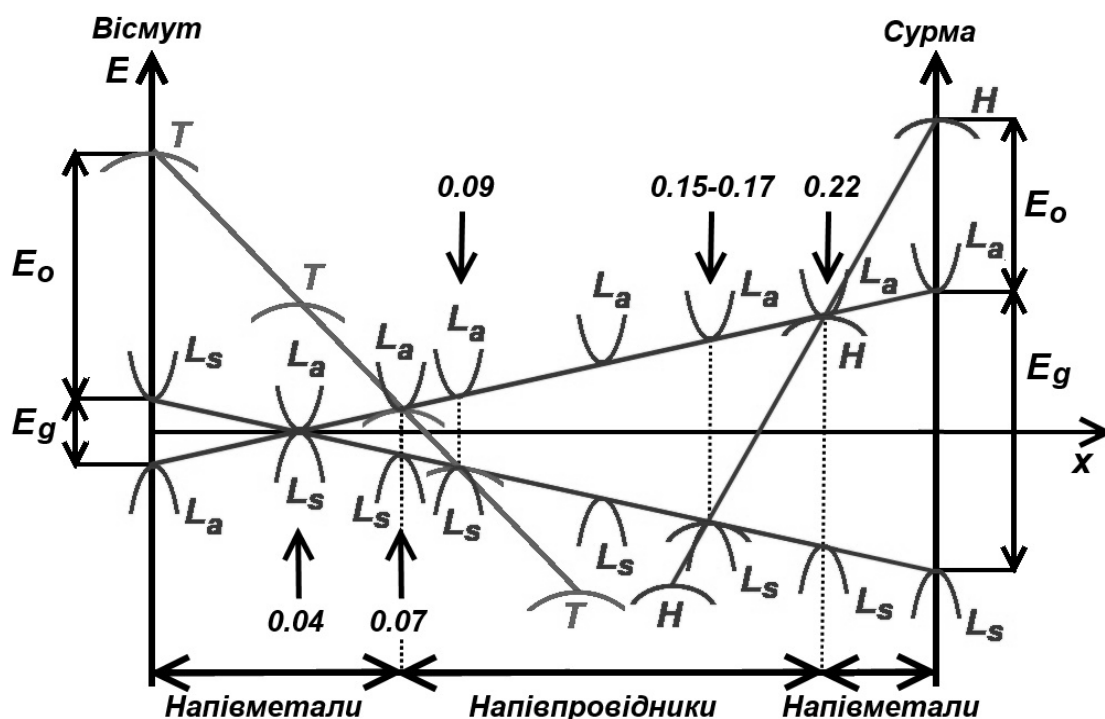


Рис. 1. Електронна зонна структура твердих розчинів $Bi_{1-x}Sb_x$.

Хоча більшість досліджень фундаментальних властивостей твердих розчинів $Bi_{1-x}Sb_x$ проводились з використанням монокристалів, на цей час все більша кількість робіт присвячена вивченню полікристалів [13 – 16]. Це пояснюється як значною простотою і економічною ефективністю виготовлення полікристалічних матеріалів, так і зручністю виготовлення з них ТЕ пристроїв різних типів. Встановлено, що характер концентраційних та температурних

залежностей ТЕ властивостей полікристалів та монокристалів $Bi_{1-x}Sb_x$ в основному однаковий, хоча розмір зерен суттєво впливає на властивості полікристалів.

Раніше [17 – 25] ми виявили немонотонну поведінку концентраційних залежностей ТЕ властивостей у полікристалічних твердих розчинах $Bi_{1-x}Sb_x$ поблизу складів $x = 0.01, 0.03, 0.07, 0.08, 0.15, 0.22$ і пояснили концентраційні аномалії властивостей поблизу $x = 0.01$ наявністю перколяційного переходу в домішковій підсистемі кристала, а інші аномалії – наявністю електронних фазових переходів (перехід до безщілинного стану, переходи напівметал - непрямозонний напівпровідник, непрямозонний – прямозонний напівпровідник).

На цей час у зв'язку з розвитком нанотехнологій низькорозмірні структури (тонкі плівки, квантові дроти, квантові точки) широко використовуються в різних галузях науки і техніки, включаючи термоелектрику. Можливість підвищення безрозмірного параметра - ТЕ добротності ($ZT = (S^2\sigma T)/\lambda$), де S – коефіцієнт Зеебека, σ – електропровідність, λ – загальна теплопровідність, T – абсолютна температура) у низькорозмірних структурах [26] стимулювали дослідження тонкоплівкових структур $Bi_{1-x}Sb_x$. Зокрема, цікавим було з'ясувати, чи будуть спостерігатися виявлені концентраційні аномалії в тонких плівках, отриманих із об'ємних кристалів. Вивчаючи тонкі плівки $Bi_{1-x}Sb_x$ в інтервалі $x = 0 - 0.09$, ми показали [27], що концентраційні аномалії властивостей також відтворюються в тонких плівках. Цікаво було поширити діапазон досліджуваних складів, враховуючи, що найвищі значення Z спостерігаються в інтервалі концентрацій $x = 0.12-0.15$ [1 – 3]. Крім того, було цікаво з'ясувати, чи впливають технологічні фактори чи умови вимірювання на факт наявності аномалій або характер їх прояву.

Об'єктами цього дослідження були тонкі плівки $Bi_{1-x}Sb_x$ товщиною $d = (250 \pm 10)$ нм, отримані термічним випаровуванням у вакуумі полікристалів $Bi_{1-x}Sb_x$ в інтервалі складів $x = 0 - 0.25$ на слюдяні підкладки при температурі $T_s = 380$ К.

В результаті проведених досліджень на залежностях ТЕ та гальваномагнітних властивостей від складу тонких плівок $Bi_{1-x}Sb_x$ були виявлені концентраційні аномалії, як і у полікристалах $Bi_{1-x}Sb_x$. Було показано, що зміни в технології отримання полікристалів та зміни в значеннях магнітного поля, яке використовувалося для вимірювання гальваномагнітних властивостей, не змінюють загального характеру залежностей ТЕ та гальваномагнітних властивостей від складу.

Методика експерименту

Тонкі плівки $Bi_{1-x}Sb_x$ товщиною $d = (250 \pm 10)$ нм отримували термічним випаровуванням полікристалів $Bi_{1-x}Sb_x$ ($x = 0 - 0.25$) у вакуумі ($\sim 10^{-6}$ Па) з одного джерела та їх конденсацією на (111) слюдяні підкладки при температурі $T_s = 380$ К зі швидкістю $0.1 - 0.3$ нм/с. Технологія приготування полікристалів $Bi_{1-x}Sb_x$ різного складу для отримання тонких плівок була описана в [27]. Єдина відмінність полягала в тому, що в цій роботі ми використовували зразки, які відпалювали після синтезу протягом 720 годин, а зразки, що використовувались для отримання плівок у роботі [27], відпалювали протягом 1200 годин.

Товщину плівки та швидкість конденсації контролювали за допомогою каліброваного кварцового резонатора. Кристалічна структура та фазовий склад вихідних матеріалів і тонких плівок досліджувались методом дифракції рентгенівських променів. На рентгенограмах для тонких плівок, аналогічно об'ємному кристалу, були лише лінії $Bi_{1-x}Sb_x$. Отримані плівки $Bi_{1-x}Sb_x$ мали мозаїчну структуру з тригональною віссю, перпендикулярною поверхні плівки. За допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії та мікрозондового аналізу було

показано, що плівковий склад відповідав складу вихідного матеріалу з точністю, не гіршою, ніж $\Delta x = \pm 0.002$.

Вимірювання транспортних властивостей проводили при кімнатній температурі на свіжовиготовлених плівках. Електропровідність σ , коефіцієнт Холла R_H та магнітоопір $\Delta\rho/\rho$ вимірювали стандартним *dc* методом на об'ємних зразках у формі паралелепіпеда та тонких плівках у формі подвійного холлівського хреста. Омичні контакти готували припаюванням індію до поверхонь об'ємного зразка або плівки. Використане значення магнітного поля ($B = 0.05$ Тл) відповідало слабкому магнітному полю на відміну від роботи [27], де використовувалось магнітне поле $B = 0.9$ Тл, яке відповідало області сильного магнітного поля. Відомо, що у слабкому магнітному полі значення R_H не залежить від B , а $\Delta\rho/\rho$ збільшується з полем за квадратичним законом. Похибка вимірювань R_H , σ та $\Delta\rho/\rho$ не перевищувала $\pm 5\%$. Коефіцієнт Зеебека S визначали відносно S_{Si} з точністю $\pm 3\%$. Вимірювали складову термоЕРС, перпендикулярну тригональній осі. Розрахунок рухливостей електронів μ_n та дірок μ_p проводили з урахуванням двох типів носіїв заряду та припускаючи, що $n = p$ (що спостерігається з високим ступенем точності у твердих розчинах $Bi_{1-x}Sb_x$), згідно формулам:

$$\sigma = en(\mu_n + \mu_p); \quad R_H = \frac{1}{en} \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}; \quad \frac{\Delta\rho}{\rho B^2} = \mu_n \mu_p \quad (1)$$

Оскільки рухливість електронів μ_n перевищує рухливість дірок μ_p , знак R_H для Bi і твердих розчинів $Bi_{1-x}Sb_x$ визначається рухливістю електронів. Це пояснює результуючий негативний знак R_H і S в об'ємних кристалах. За результатами вимірювання значень σ , R_H , $\Delta\rho/\rho$ та S і з урахуванням величини B були розраховані значення $n = p$, μ_n , μ_p та коефіцієнт ТЕ потужності $P(x) = S^2\sigma$.

Результати

На рис. 2-4 наведені концентраційні залежності $R_H(x)$, $S(x)$, $\Delta\rho/\rho(x)$, $\mu_n(x)$, $\mu_p(x)$ та $P(x)$ для об'ємних кристалів і тонких плівок $Bi_{1-x}Sb_x$. Видно, що всі залежності мають чітко немонотонний, осцилюючий характер.

Відповідно до вимірювання S , усі отримані тонкі плівки, як і вихідні полікристали, мали електронний тип провідності. З рис. 2, а видно, що залежності $S(x)$ для об'ємних полікристалів і тонких плівок дуже схожі. Додавання атомів Sb до вісмуту до $x \sim 0.10$ призводить до значного збільшення S через зменшення перекриття зон T і L_S та утворення напівпровідникової області (рис. 1). Після цього S зменшується. Однак ми говоримо лише про загальну тенденцію зміни S в діапазоні $x = 0 - 0.25$. Але залежність $S(x)$ як для об'ємних кристалів, так і для тонких плівок демонструє кілька піків або перегинів поблизу складів $x = 0.01, 0.02, 0.05, 0.12$ та 0.18 , які ми віднесли [17 – 25] до перколяційного переходу та електронних фазових переходів. Відповідно до вимірювань R_H , всі вихідні полікристали також мали електронний тип провідності. У залежності $R_H(x)$ для полікристалів (рис. 2,б), на додаток до вказаних аномалій на залежності $S(x)$ (рис. 2, а), нам вдалося при $x \sim 0.08$ виявити пік, пов'язаний з переходом непрямоzonний – прямоzonний напівпровідник, коли вершина T -зони збігається з вершиною L_S -зони [24, 25]. У залежності $S(x)$, на відміну від залежності $R_H(x)$, є одна розмита аномальна ділянка в інтервалі $x = 0.05 - 0.08$ / (рис. 2.а).

Залежність $R_H(x)$ для тонких плівок (рис. 2,б) виявилася більш складною: крива $R_H(x)$ мала ряд особливостей, пов'язаних зі зміною типу провідності. Bi мав p -тип провідності ($R_H > 0$), але

введення перших порцій Sb (до $x \sim 0.007$) призвело до інверсії знаку провідності ($p \rightarrow n$). Потім, при $x \sim 0.01$, тип провідності знову змінився ($n \rightarrow p$), а потім спостерігалася нова зміна знаку провідності при $x \sim 0.02$ ($p \rightarrow n$). Після цього, при подальшому збільшенні x , знак R_H для всіх плівок був негативним ($R_H < 0$), як для об'ємних кристалів.

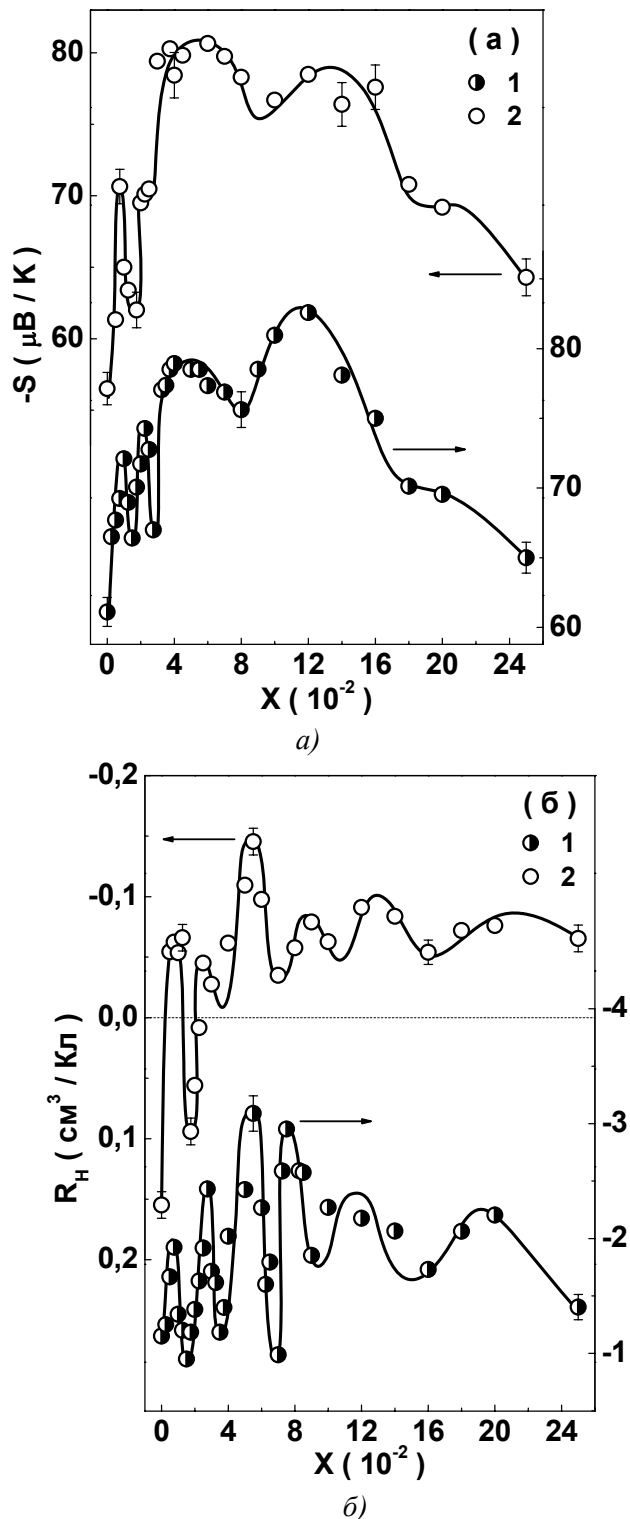


Рис. 2. Залежності коефіцієнта Зеебека S (а) і коефіцієнта Холла R_H (б) від складу x полікристалів (1) та тонких плівок (2) $Bi_{1-x}Sb_x$ за кімнатної температури. Суцільні лінії – орієнтири для ока.

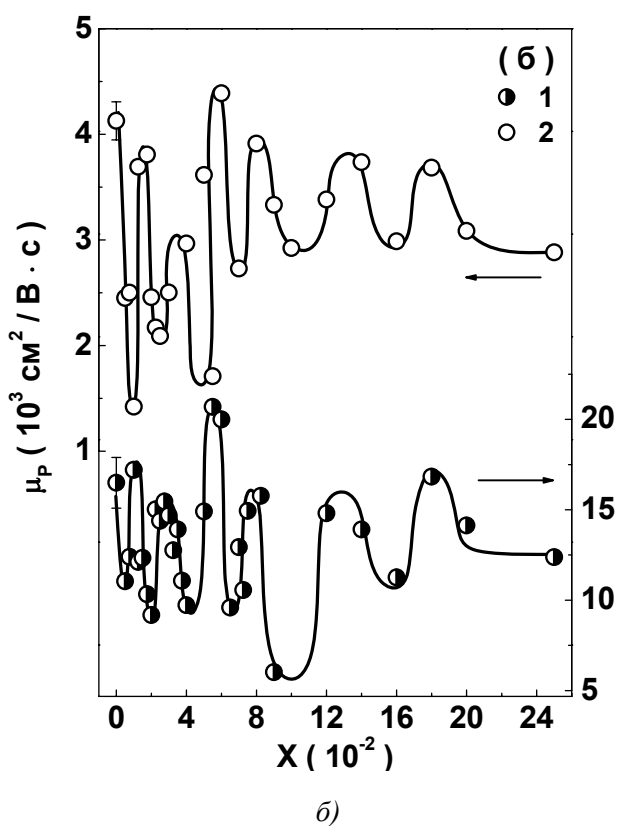
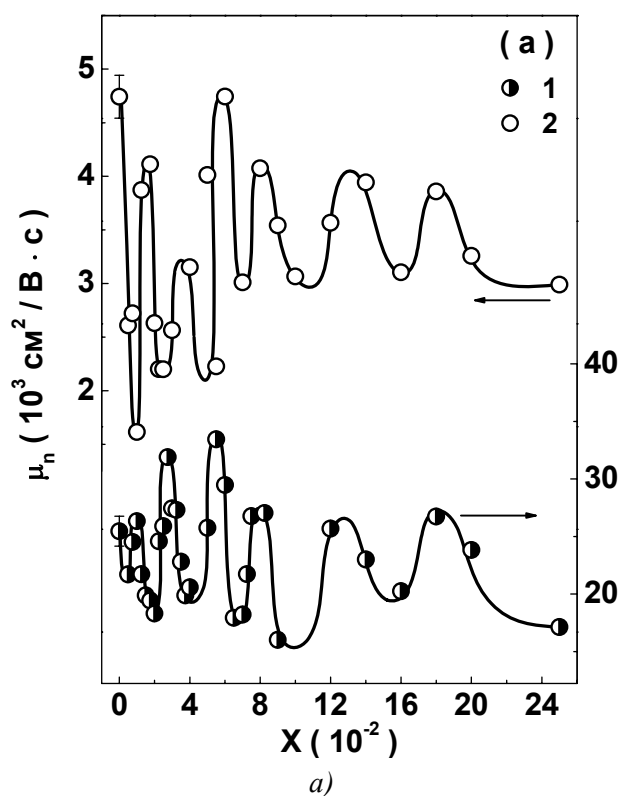


Рис. 3. Залежності електронної μ_n (а) і діркової μ_p (б) рухливостей від складу x полікристалів (1) та тонких плівок (2) $Bi_{1-x}Sb_x$ за кімнатної температури. Суцільні лінії – орієнтири для ока.

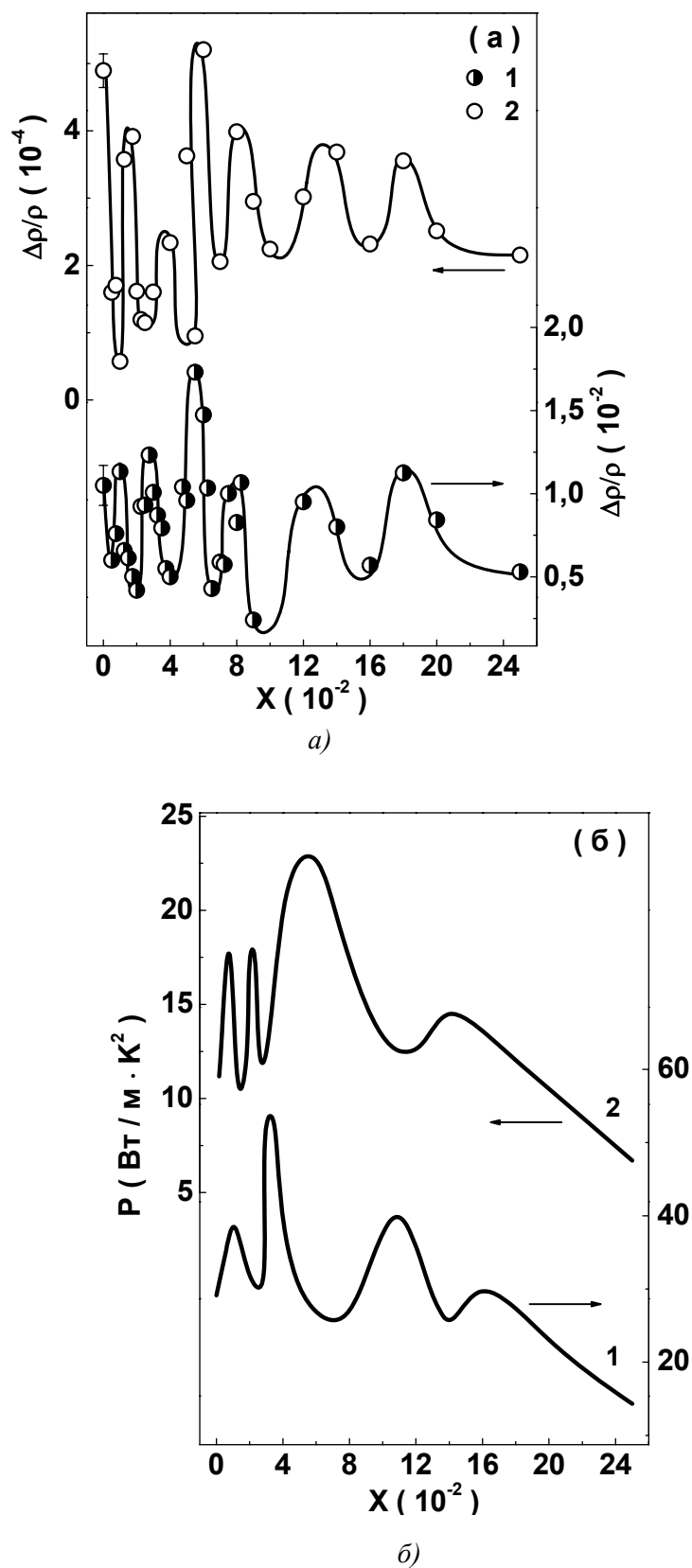


Рис. 4. Залежності магнітоопору $\Delta\rho/\rho$ (а) та термоелектричної потужності $P = S^2 \sigma$ (б) від складу x полікристалів (1) та тонких плівок (2) $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ за кімнатної температури. Суцільні лінії – орієнтири для ока.

Причиною різниці між знаками R_H та S може бути наступна. Згідно з [28], у монокристалах вісмуту R_H має позитивний знак лише вздовж напрямку тригональної осі, а в перпендикулярних напрямках знак змінюється на негативний. На відміну від R_H , коефіцієнт Зеебека в будь-якому кристалографічному напрямку залишається негативним. Плівки $Bi_{1-x}Sb_x$ вирощували вздовж напрямку тригональної осі [001], яка була перпендикулярна площині підкладки. Ось чому для плівок Bi спостерігали позитивний знак R_H та негативний знак S [29]. Введення Sb призводить до пружних спотворень кристалічної решітки, і зі збільшенням x орієнтація вздовж тригональної осі [001] стає все менш досконалою, і при певній концентрації Sb така орієнтація практично зникає. Переконливим фактом, що підтверджує це припущення, є негативний знак R_H , який спостерігали автори [30] у полікристалічних плівках Bi , у яких немає анізотропії властивостей.

Звернемо увагу на наступну обставину. Як зазначалося вище, раніше нами припускалося [17–25], що в діапазоні складів $x = 0.005 - 0.01$ відбувається перколяційний перехід від домішкового дисконтинууму до домішкового континууму, що з великою долею ймовірності супроводжується процесами упорядкування [31]. Ці процеси можуть стимулювати формування більш досконалої орієнтованої структури та визначати інверсію типу провідності ($n \rightarrow p$). Подальше збільшення концентрації Sb знову робить структуру менш досконалою і призводить до інверсії знаку провідності ($p \rightarrow n$). Наближення до переходу у безщілинний стан призводить до зменшення R_H , але більше не викликає інверсію типу провідності ($n \rightarrow p$), оскільки значна кількість домішкових атомів робить орієнтовану структуру ще більш недосконалою. Таким чином, зміна знака R_H певним чином відображає зміну ступеня досконалості структури (ступеня орієнтації), що, в свою чергу, пов'язано з наявністю фазових переходів. У певному сенсі тип провідності може бути використаний для оцінки ступеня анізотропії в структурі плівки. Це, звичайно, стосується лише випадку, коли тип провідності залежить від напрямку в кристалі.

Зазначимо, що в роботі [27], в якій плівки $Bi_{1-x}Sb_x$ досліджувались лише в діапазоні концентрацій $x = 0 - 0.1$, на перколяційному переході поблизу $x = 0.01$ не спостерігалось зміни знака R_H . Можливо, це було пов'язано з тим, що вимірювання R_H проводились у сильному магнітному полі ($B = 0.9$ Тл), а не в слабкому магнітному полі ($B = 0.05$ Тл), як у цій роботі.

Зміна знака R_H у плівках залежно від x ускладнює порівняння залежностей $R_H(x)$ для об'ємних та плівкових зразків. Однак видно з рис. 2б, що, незважаючи на поперемінну зміну знака R_H в діапазоні $x = 0 - 0.02$, характер залежності $R_H(x)$ залишається таким же, як і для об'ємних кристалів, що мають екстремуми при фазових переходах вищезазначених типів, якщо за початок відліку взяти значення R_H вісмуту ($x = 0$). Іншими словами, зміна знака R_H не заважає спостерігати концентраційні аномалії властивостей.

Розрахунок значень μ_n та μ_p за допомогою рівняння (1) показав, що залежності $\mu_n(x)$ та $\mu_p(x)$ мають також яскраво виражений немонотонний характер (рис. 3). Існує кілька чітких максимумів при $x \sim 0.01$, ~ 0.03 , ~ 0.06 , ~ 0.08 , ~ 0.14 та ~ 0.18 . Ці концентрації відповідають характерним складам (рис. 1), при яких відбуваються якісні зміни в електронній структурі $Bi_{1-x}Sb_x$. Слід зазначити, що в цих залежностях, а також у залежності $R_H(x)$ можна виділити два максимуми, що відповідають переходу напівметал – непрямозонний напівпровідник та непрямозонний напівпровідник -прямозонний напівпровідник ($x \sim 0.06$ та $x \sim 0.08$, відповідно). Залежність $\Delta\rho/\rho(x)$ (рис. 4а) фактично повторює характер залежностей $\mu_n(x)$ та $\mu_p(x)$.

Теоретично було показано [32], що зонна структура $Bi_{1-x}Sb_x$ залежить не тільки від складу та товщини плівки, але й від орієнтації плівки на підкладці. Отже, можна очікувати, що при низьких концентраціях Sb , коли ступінь анізотропії в плівці досить висока, екстремуми на концентраційних залежностях властивостей плівок можуть бути зміщені щодо цих положень у

кристалі. Деякий зсув максимумів від залежностей $\Delta\rho/\rho(x)$, $\mu_n(x)$ та $\mu_p(x)$ для об'ємних кристалів та плівок у діапазоні складів $x = 0 - 0.1$ пов'язаний, мабуть, із цією обставиною.

На рис. 4, б представлені концентраційні залежності ТЕ потужності $P = S^2 \sigma$ для об'ємних кристалів і тонких плівок. Більш низькі значення P в тонких плівках порівняно з об'ємними кристалами можна пояснити меншими значеннями електропровідності в тонких плівках, оскільки значення коефіцієнта Зеебека практично однакові в кристалах і плівках (рис. 2а). Рис. 4 показує, що залежність $P(x)$, як і залежності від складу для всіх інших кінетичних коефіцієнтів кристалів і плівок, має виразно немонотонний характер. Склади, при яких спостерігаються максимальні значення P , різні для кристалів і тонких плівок ($x \sim 0.03$ та $x \sim 0.06$, відповідно). Однак ці дані відповідають 300 К, тоді як найвищі значення ТЕ добротності відповідають температурам нижче 200 К [1 – 3]. Тому наступним завданням є отримання температурних залежностей кінетичних коефіцієнтів тонких плівок $Bi_{1-x}Sb_x$.

Таким чином, можна зробити висновок, що концентраційні аномалії ТЕ та гальваномагнітних властивостей, що спостерігаються для полікристалів $Bi_{1-x}Sb_x$ і пояснюються [17 – 25] наявністю критичних явищ, що супроводжують фазові переходи, відтворюються у тонких плівках, отриманих з цих кристалів. Зміна технології отримання вихідних кристалів (скорочення часу відпалу матеріалів з 1200 до 720 годин) не змінює якісно поведінку концентраційних залежностей кінетичних коефіцієнтів кристалів і тонких плівок. Характер магнітного поля (сильне чи слабе), в якому вимірюються гальваномагнітні властивості, також не змінює загального характеру залежностей властивостей від складу та наявності аномалій, а лише впливає на значення R_H і $\Delta\rho/\rho$.

Однак слід зазначити, що це спостерігається в достатньо "товстих" плівках ($d = 250 \pm 10$ нм), коли квантові розмірні ефекти (наприклад, осцилюючий характер d – залежностей кінетичних властивостей) практично не проявляються. Перехід до дуже тонких плівок та прояв цих ефектів можуть суттєво змінити фізичну картину. Однак у ряді випадків тонкоплівкові ТЕ перетворювачі енергії використовуються з товщинами шарів, коли квантові розмірні ефекти не проявляються.

Висновки

1. Встановлено, що концентраційні аномалії ТЕ та гальваномагнітних властивостей, пов'язані з проявом критичних явищ, що супроводжують перколяційний та електронні фазові переходи у полікристалах $Bi_{1-x}Sb_x$ в інтервалі концентрацій $x = 0 - 0.25$, значною мірою відтворюються в тонких плівках $Bi_{1-x}Sb_x$ товщиною $d = (250 \pm 10)$ нм, отриманих з цих кристалів термічним випаровуванням у вакуумі на слюдяних підкладках.
2. Зміна величини магнітного поля, що використовується при вимірюванні R_H та магнітоопору, зміна технології отримання полікристалів, з яких виготовлені плівки (зменшення часу відпалу з 1200 до 720 годин), не впливають на факт наявності аномалій як у полікристалах, так і у тонких плівках.
3. Виявлено чергування знака R_H в діапазоні $x = 0 - 0.02$ із зміною складу при сталості знака коефіцієнта Зеебека в тонких плівках $Bi_{1-x}Sb_x$. Знак R_H у плівці залежить від ступеня анізотропії плівки, що, в свою чергу, залежить від наявності фазового переходу. Зміна знака R_H із зміною складу не є перешкодою для виявлення аномалій на концентраційних залежностях властивостей.
4. Отримані результати є ще одним підтвердженням факту наявності перколяційного та електронних фазових переходів у твердих розчинах $Bi_{1-x}Sb_x$, які проявляються в критичних явищ, що

спостерігаються не тільки в кристалах, але і в плівках.

5. Добра збіжність критичних складів у концентраційних залежностях властивостей кристалів $Bi_{1-x}Sb_x$ і тонких плівок свідчить про хорошу відтворюваність складів полікристалів у тонких плівках отриманих з цих полікристалів.
6. Слід враховувати існування концентраційних аномалій ТЕ та гальваномангнітних властивостей $Bi_{1-x}Sb_x$ в об'ємному і тонкоплівковому станах під час інтерпретації результатів досліджень, прогнозуванні ТЕ властивостей та використанні полікристалів і тонких плівок $Bi_{1-x}Sb_x$ у ТЕ перетворювачах енергії.

Подяка. Ця робота була підтримана Міністерством освіти і науки України (Проект № М 0625).

Література

1. Anatyshuk L.I., Thermoelements and Thermoelectric Devices: Reference Book, Kyiv, Naukova Dumka, 1979, 768 p.
2. Lenoir B., Scherrer H. and Caillat T., An overview of recent developments for BiSb alloys, Chapter 4, In: Tritt T.M. (ed.) Semiconductors and Semimetals: Recent Trends in Thermoelectric Materials Research I, Vol. 69, San Diego, Academic Press, 2001, pp. 101-137.
3. Uher C. (ed.), Materials Aspect of Thermoelectricity. CRC Press, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016, 610 p.
4. Fu L., Kane C.L. and Mele E.J., Topological insulators in three dimensions, Phys. Rev. Lett., 98(10), 2007, pp. 106803.
5. Hsieh D., Qian D., Wray L., Xia Y., Hor Y.S., Cava R.J. and Hasan M.Z., A topological Dirac insulator in a Quantum Spin Hall phase, Nature, 452, 2008, pp. 970-974.
6. Takahashi R. and Murakami S., Thermoelectric transport in topological insulators Semicond. Sci. Technol., 27(12), 2012, pp. 124005-8.
7. Muehler L., Casper F., Yan B., Chadov S., and Felser C., Topological insulators and thermoelectric materials, Phys. Stat. Solidi RRL, 7(1-2), 2013, pp. 91-100.
8. Ugay Ya.A., Goncharov Ye.G., Semenova G.V. and Lazarev V.B., Phase Equilibria between Phosphorus, Arsenic and Bismuth, Moscow, Nauka, 1989, 233 p.
9. Brandt N.B., Chudinov S.M., and Karavaev V.G. Investigation of the zero-gap state induced by a magnetic field in bismuth-antimony alloys, Sov. Phys. JETP, 43(6), 1976, pp. 1198-1209; Zh. Eksp. Teor. Fiz. 70, 2296-2317 (in Russian)
10. Yasaki T. and Abe Y., Galvanomagnetic investigations of the $Bi_{1-x}Sb_x$ ($0 < x < 0.15$) system at 77 K, J. Phys. Soc. Jpn., 24(2), 1968, pp. 290-295.
11. Mironova G.A., Sudakova M.B., Ponomarev Ya.G. Dispersion law of carriers in the $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys, Sov. Phys. Solid State, 22(12), 1980, pp. 2124; Fizika tverd. tela., 22(12), 1980, pp. 3628-3634 (in Russian).
12. Mironova G.A., Sudakova M.B., Ponomarev Ya.G., Investigation of the band structure of semiconducting $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys, Sov. Phys. JETP, 51(5), 1980, pp. 918-929.
13. Kitagawa H., Noguchi H., Kiyabu T., Itoh M. and Noda Y., Thermoelectric properties of Bi Sb semiconducting alloys prepared by quenching and annealing, J. Phys. Chem. Solids, 65(7), 2004, pp. 1223-1227.
14. Malik K., Das D., Mondal D., Chattopadhyay D., Deb A.K., Bandyopadhyay S. and Banerjee A., Sb

- concentration dependent structural and resistive properties of polycrystalline $Bi-Sb$ alloys, *J. Appl. Phys.*, 112(12), 2012, pp. 083706.
15. Dutta S., Shubha V. and Ramesh T.G. and Sa F., Thermal and electronic properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys, *J. Alloy Compd.*, 467(1), 2009, pp. 305–309.
 16. Lenoir B., Dauscher A., Cassart M., Ravich Y.I. and Scherrer H. Effect of antimony content on the thermoelectric figure of merit of $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys, *J. Phys. Chem. Solids.*, 59(1), 1998, pp. 129-134.
 17. Rogacheva E.I. and Drozdova A.A., Thermoelectric properties of polycrystalline Bismuth-Antimony Solid Solutions, *J. Thermoelectricity*, 2, 2006, pp. 22-28.
 18. Rogacheva E.I., Yakovleva A.A. (Drozdova A.A.), Pinegin V.I. and Dresselhaus M.S., Concentration Anomalies of Properties in Bi-Sb Semimetallic Solid Solutions, *J. Phys. Chem. Solids*, 69(2-3), 2008, pp. 580-584.
 19. Rogacheva E.I., Drozdova A.A., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S. and Dresselhaus G., Transition into a gapless state and concentration anomalies in the properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions, *Appl. Phys. Lett.*, 94(20), 2009, pp. 202111.
 20. Rogacheva E.I., Drozdova A.A. and Nashchekina O.N., Percolation effects in semimetallic Bi-Sb solid solutions, *Phys. Stat. sol. (a)*, 207(2), 2010, pp. 344–347.
 21. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Nashchekina O.N. and Yu.V. Men'shov, Thermal Conductivity in $Bi_{1-x}Sb_x$ Solid Solutions, *J. Electron. Mater.*, 42(7), 2013, pp. 2098-2102.
 22. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Pinegin V.I. and Dresselhaus M.S. Electronic phase transitions and structural instability in $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions, *J. Thermoelectricity*, 6, 2013, pp. 13-20.
 23. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Nashchekina O.N. and Dresselhaus M.S. Specific heat critical behavior in $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions, *Appl. Phys. Lett.*, 109(13), 2016, pp. 131906.
 24. Doroshenko A.N., Rogacheva E.I., Drozdova A.A., Martynova K.V., Men'shov Yu.V. Thermoelectric properties of polycrystalline $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions in the concentration range $x = 0 - 0.25$, *J. Thermoelectricity*, 4, 2016, pp. 23-36.
 25. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Drozdova A.A., Nashchekina O.N., Men'shov Yu.V. Galvanomagnetic properties of polycrystalline $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions in the concentration range $x = 0 - 0.25$, *Functional Materials*, 27(3), 2020, pp. 488-496. <https://doi.org/10.15407/fm27.03.488>
 26. Dresselhaus M.S., Lin Y.-M., Cronin S.B., Rabin O, Black M.R., Dresselhaus G., Quantum wells and quantum wires for potential thermoelectric applications, In Tritt T.M. (ed.) *Semiconductors and Semimetals: Recent Trends in Thermoelectric Materials Research III*, Vol. 71, Academic Press, San Diego, CA, 2001, pp. 1–121.
 27. Rogacheva E.I., Nashchekina O.N., Orlova D.S., Doroshenko A.N., Dresselhaus M.S. Influence of Composition on the Thermoelectric Properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ Thin Films, *J. Electron. Mater.* 46(7), 2017, 3821-3825.
 28. Jain A.L., Temperature Dependence of the Electrical Properties of Bismuth-Antimony Alloys, *Phys. Rev. B* 114(6), 1959, pp.1518 -1528.
 29. E.I. Rogacheva, S.N. Grigorov, O.N. Nashchekina, S.G. Lyubchenko, M.S. Dresselhaus, Quantum Size Effects in n-type Bi Thin Films, *Appl. Phys. Lett.* 82, 2003, pp. 2628-2630.
 30. V.I. Petrosyan, V.N. Molin, E.I. Dagman, B.A. Tavger, P.A. Skripkina, L.N. Alexandrov, Quantum size transition semimetal-semiconductor in super-thin Bi films, *Phys. Metallov i Metallovedenie*, 31, 1971, pp. 725-730 (in Russian)
 31. Rogacheva E.I., Self-organization processes in impurity subsystem of solid solution, *J. Phys. Chem. Solids*, 64(9-10), 2003, 1579-1583.

32. Tang Sh., Dresselhaus M.S. Phase diagrams of $Bi_{1-x}Sb_x$ thin films with different growth orientations. Phys.Rev. B, 86(7), 2012, pp. 075436(1-6). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.075436

Надійшла до редакції 07.04.2020

Рогачова Е.И., *докт. фіз.-мат. наук, професор*
Дорошенко Г.М.,
Сипатов А.Ю. *докт. фіз.-мат. наук, професор*

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков 61002, Украина,
e-mail: rogachova.olena@gmail.com

ЭЛЕКТРОННЫЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ $Bi_{1-x}Sb_x$

Целью данной работы было изучение концентрационных зависимостей TO и гальваномагнитных свойств тонких пленок $Bi_{1-x}Sb_x$ в интервале $x = 0 - 0.25$. Тонкие пленки $Bi_{1-x}Sb_x$ толщиной $d = (250 \pm 10)$ нм были изготовлены термическим испарением в вакууме кристаллов $Bi_{1-x}Sb_x$ на (111) слюдяные подложки, а транспортные свойства (электропроводность, коэффициент Зеебека, коэффициент Холла, подвижность электронов и дырок, магнитное) пленок измерялись при комнатной температуре. Было установлено, что все аномалии на концентрационных зависимостях свойств, которые наблюдались ранее в массивных кристаллах $Bi_{1-x}Sb_x$ и связаны с электронными фазовыми переходами, воспроизводились в тонких пленках. Полученные данные, с одной стороны, - это еще одно доказательство существования концентрационных особенностей в транспортных свойствах твердых растворов $Bi_{1-x}Sb_x$, а с другой стороны, эти данные указывают на хорошую соответствие складов выходных кристаллов составам тонких пленок. Полученные результаты следует учитывать при интерпретации результатов исследований и прогнозировании свойств кристаллов и тонких пленок $Bi_{1-x}Sb_x$.

Ключевые слова: $Bi_{1-x}Sb_x$, твердый раствор тонкая пленка; концентрация; фазовый переход; термоэлектрические свойства; гальваномагнитные свойства

E.I. Rogacheva, *doc. phys.-math science, professor*
A.N. Doroshenko,
A.Yu. Sipatov, *doc. phys.-math science, professor*

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
2 Kyrpychova St., Kharkiv 61002, Ukraine,
e-mail: rogachova.olena@gmail.com

ELECTRONIC PHASE TRANSITIONS IN THIN $Bi_{1-x}Sb_x$ FILMS

The goal of the present work is to study the concentration dependences of thermoelectric (TE) and galvanomagnetic properties of thin $Bi_{1-x}Sb_x$ films in the range $x = 0 - 0.25$. The thin films with thicknesses $d = (250 \pm 10)$ nm were prepared by thermal evaporation in vacuum of $Bi_{1-x}Sb_x$ polycrystals onto (111) mica substrates and the transport properties (the electrical conductivity, Seebeck coefficient, Hall coefficient, electronic and hole mobility, magnetoresistance) of the films were measured at the room temperature. It was established that all anomalies in the concentration dependences of the properties, observed earlier in the $Bi_{1-x}Sb_x$ bulk crystals and attributed to electronic phase transitions, were reproduced in thin films. The data obtained represent another evidence of the existence of the concentration peculiarities in the transport properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions, indicate a good correspondence between the compositions of $Bi_{1-x}Sb_x$ initial polycrystals and that of the thin films, and should be taken into account when interpreting the results of studies and predicting properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ crystals and thin films.

Key words: $Bi_{1-x}Sb_x$, solid solution, thin film, concentration, phase transition, thermoelectric properties, galvanomagnetic properties

References

1. Anatyshuk L.I., Thermoelements and Thermoelectric Devices: Reference Book, Kyiv, Naukova Dumka, 1979, 768 p.
2. Lenoir B., Scherrer H. and Caillat T., An overview of recent developments for BiSb alloys, Chapter 4, In: Tritt T.M. (ed.) Semiconductors and Semimetals: Recent Trends in Thermoelectric Materials Research I, Vol. 69, San Diego, Academic Press, 2001, pp. 101-137.
3. Uher C. (ed.), Materials Aspect of Thermoelectricity. CRC Press, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016, 610 p.
4. Fu L., Kane C.L. and Mele E.J., Topological insulators in three dimensions, Phys. Rev. Lett., 98(10), 2007, pp. 106803.
5. Hsieh D., Qian D., Wray L., Xia Y., Hor Y.S., Cava R.J. and Hasan M.Z., A topological Dirac insulator in a Quantum Spin Hall phase, Nature, 452, 2008, pp. 970-974.
6. Takahashi R. and Murakami S., Thermoelectric transport in topological insulators Semicond. Sci. Technol., 27(12), 2012, pp. 124005-8.
7. Muehler L., Casper F., Yan B., Chadov S., and Felser C., Topological insulators and thermoelectric materials, Phys. Stat. Solidi RRL, 7(1-2), 2013, pp. 91-100.
8. Ugay Ya.A., Goncharov Ye.G., Semenova G.V. and Lazarev V.B., Phase Equilibria between Phosphorus, Arsenic and Bismuth, Moscow, Nauka, 1989, 233 p.
9. Brandt N.B., Chudinov S.M., and Karavaev V.G. Investigation of the zero-gap state induced by a magnetic field in bismuth-antimony alloys, Sov. Phys. JETP, 43(6), 1976, pp. 1198-1209; Zh. Eksp. Teor. Fiz. 70, 2296-2317 (in Russian)
10. Yasaki T. and Abe Y., Galvanomagnetic investigations of the $Bi_{1-x}Sb_x$ ($0 < x < 0.15$) system at 77 K, J. Phys. Soc. Jpn., 24(2), 1968, pp. 290-295.
11. Mironova G.A., Sudakova M.B., Ponomarev Ya.G. Dispersion law of carriers in the $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys, Sov. Phys. Solid State, 22(12), 1980, pp. 2124; Fizika tverd. tela., 22(12), 1980, pp. 3628-3634 (in Russian).

12. Mironova G.A., Sudakova M.B., Ponomarev Ya.G., Investigation of the band structure of semiconducting $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys, *Sov. Phys. JETP*, 51(5), 1980, pp. 918-929.
13. Kitagawa H., Noguchi H., Kiyabu T., Itoh M. and Noda Y., Thermoelectric properties of Bi Sb semiconducting alloys prepared by quenching and annealing, *J. Phys. Chem. Solids*, 65(7), 2004, pp. 1223-1227.
14. Malik K., Das D., Mondal D., Chattopadhyay D., Deb A.K., Bandyopadhyay S. and Banerjee A., Sb concentration dependent structural and resistive properties of polycrystalline $Bi-Sb$ alloys, *J. Appl. Phys.*, 112(12), 2012, pp. 083706.
15. Dutta S., Shubha V. and Ramesh T.G. and D'Sa F., Thermal and electronic properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys, *J. Alloy Compd.*, 467(1), 2009, pp. 305-309.
16. Lenoir B., Dauscher A., Cassart M., Ravich Y.I. and Scherrer H. Effect of antimony content on the thermoelectric figure of merit of $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys, *J. Phys. Chem. Solids.*, 59(1), 1998, pp. 129-134.
17. Rogacheva E.I. and Drozdova A.A., Thermoelectric properties of polycrystalline Bismuth-Antimony Solid Solutions, *J. Thermoelectricity*, 2, 2006, pp. 22-28.
18. Rogacheva E.I., Yakovleva A.A. (Drozdova A.A.), Pinegin V.I. and Dresselhaus M.S., Concentration Anomalies of Properties in Bi-Sb Semimetallic Solid Solutions, *J. Phys. Chem. Solids*, 69(2-3), 2008, pp. 580-584.
19. Rogacheva E.I., Drozdova A.A., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S. and Dresselhaus G., Transition into a gapless state and concentration anomalies in the properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions, *Appl. Phys. Lett.*, 94(20), 2009, pp. 202111.
20. Rogacheva E.I., Drozdova A.A. and Nashchekina O.N., Percolation effects in semimetallic Bi-Sb solid solutions, *Phys. Stat. sol. (a)*, 207(2), 2010, pp. 344-347.
21. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Nashchekina O.N. and Yu.V. Men'shov, Thermal Conductivity in $Bi_{1-x}Sb_x$ Solid Solutions, *J. Electron. Mater.*, 42(7), 2013, pp. 2098-2102.
22. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Pinegin V.I. and Dresselhaus M.S. Electronic phase transitions and structural instability in $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions, *J. Thermoelectricity*, 6, 2013, pp. 13-20.
23. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Nashchekina O.N. and Dresselhaus M.S. Specific heat critical behavior in $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions, *Appl. Phys. Lett.*, 109(13), 2016, pp. 131906.
24. Doroshenko A.N., Rogacheva E.I., Drozdova A.A., Martynova K.V., Men'shov Yu.V. Thermoelectric properties of polycrystalline $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions in the concentration range $x = 0 - 0.25$, *J. Thermoelectricity*, 4, 2016, pp. 23-36.
25. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Drozdova A.A., Nashchekina O.N., Men'shov Yu.V. Galvanomagnetic properties of polycrystalline $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions in the concentration range $x = 0 - 0.25$, *Functional Materials*, 27(3), 2020, pp. 488-496. <https://doi.org/10.15407/fm27.03.488>
26. Dresselhaus M.S., Lin Y.-M., Cronin S.B., Rabin O, Black M.R., Dresselhaus G., Quantum wells and quantum wires for potential thermoelectric applications, In Tritt T.M. (ed.) *Semiconductors and Semimetals: Recent Trends in Thermoelectric Materials Research III*, Vol. 71, Academic Press, San Diego, CA, 2001, pp. 1-121.
27. Rogacheva E.I., Nashchekina O.N., Orlova D.S., Doroshenko A.N., Dresselhaus M.S. Influence of Composition on the Thermoelectric Properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ Thin Films, *J. Electron. Mater.* 46(7), 2017, 3821-3825.
28. Jain A.L., Temperature Dependence of the Electrical Properties of Bismuth-Antimony Alloys, *Phys. Rev. B* 114(6), 1959, pp. 1518 -1528.

29. E.I. Rogacheva, S.N. Grigorov, O.N. Nashchekina, S.G. Lyubchenko, M.S. Dresselhaus, Quantum Size Effects in n-type Bi Thin Films, *Appl. Phys. Lett.* 82, 2003, pp. 2628-2630.
30. V.I. Petrosyan, V.N. Molin, E.I. Dagman, B.A. Tavger, P.A. Skripkina, L.N. Alexandrov, Quantum size transition semimetal-semiconductor in super-thin Bi films, *Phys. Metallov i Metallovedenie*, 31, 1971, pp. 725-730 (in Russian)
31. Rogacheva E.I., Self-organization processes in impurity subsystem of solid solution, *J. Phys. Chem. Solids*, 64(9-10), 2003, 1579-1583.
32. Tang Sh., Dresselhaus M.S. Phase diagrams of $Bi_{1-x}Sb_x$ thin films with different growth orientations. *Phys. Rev. B*, 86(7), 2012, pp. 075436(1-6). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.075436

Submitted: 07.04.2020

УДК 537.32

**Н.А. Годованец¹, І.А.
Константинович І.А.** канд. фіз.-мат. наук, доцент^{1,2},
А.В. Константинович док. фіз.-мат. наук, доцент²,
С.Д. Шугані¹

¹Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна,

²Інститут термоелектрики НАН і МОН України,

вул. Науки 1, Чернівці, 58029, Україна

e-mail: dj_kneo@ukr.net; aconst@ukr.net;

i.konstantynovych@chnu.edu.ua

ГІРОТРОПНІ ТЕРМОЕЛЕМЕНТИ В ОДНОРІДНОМУ ТА НЕОДНОРІДНОМУ МАГНІТНИХ ПОЛЯХ

За допомогою комп'ютерного моделювання визначено розподіли температур у робочому тілі гіротропних термоелементів в однорідному та неоднорідному магнітних полях. Визначено температурні залежності ККД гіротропних термоелементів в однорідному та неоднорідному магнітних полях. Встановлено, що ККД генераторних гіротропних термоелементів більше в неоднорідному магнітному полі ніж в однорідному полі. Бібл. 19, рис. 3.

Ключові слова: коефіцієнт Нернста-Етtingсгаузена, гіротропний термоелемент, неоднорідне магнітне поле, термоелектричний матеріал, термомагнітна добротність, ККД.

Вступ

Нині одним з перспективних напрямків розвитку термоелектрики є створення нових типів термоелементів в тому числі гіротропних та більш детальне дослідження вже відомих термоелементів. Останніми роками опубліковано низку робіт про гіротропні термоелементи в постійних магнітних полях [1-18], також розглянуті деякі параметри цих термоелементів в неоднорідних магнітних полях [7]. Розглянуті гіротропні термоелементи ефективність яких зростає за рахунок збудження вихрових термоелектричних струмів в гіротропному термоелектричному середовищі, дають можливість отримувати підвищені термоелектричні напруги та відрізняються від відомих багатофункціональністю, вони є перспективними для використання як в спеціальних термогенераторах, так і в приладах вимірювальної техніки. Але ці можливості мало використані, тому їх розробка дозволить збільшити елементну базу термоелектрики, покращити конкурентну спроможність термоелектричних перетворювачів та гіротропних термоелементів в тому числі, створити більш досконалу термоелектричну продукцію на їх основі, та підвищити її якість і надійність.

Тому актуальність роботи полягає у необхідності подальшого дослідження гіротропних термоелементів в однорідних та неоднорідних магнітних полях, для підвищення їх ефективності та надійності та створення термоелектричних перетворювачів енергії з покращеними характеристиками.

Метою роботи є оцінка ефективності гіротропних термоелементів в однорідному та неоднорідному магнітних полях у режимі генерації електричної енергії.

Математична модель

Для дослідження параметрів гіротропних термоелементів необхідно розв'язати наступне рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами:

$$\kappa \Delta T + \rho_0 j^2 + 2\alpha_a \left(j_y \frac{\partial T}{\partial x} - j_x \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

де T – температура; κ – коефіцієнт теплопровідності гіротропного середовища; ρ_0 – питомий електричний опір; x, y – координати; j, j_x, j_y – модуль та проекції вектора густини електричного струму; $\alpha_{\perp} = Q_{\perp} B$ – асиметрична частина тензора термоЕРС; Q_{\perp} – поперечний коефіцієнт Нернста-Еттингсгаузена; B – індукція магнітного поля.

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_0 & \alpha_a & 0 \\ -\alpha_a & \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\perp} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де α_0, α_{\perp} – діагональні компоненти тензора термоЕРС.

Для отримання вихрових струмів доцільніше розглядати спіральні термоелементи. Враховуючи аксіальну симетрію (1) маємо

$$\Delta T + \frac{j_{\varphi}^2}{\kappa \sigma} + \frac{1}{\kappa} j_{\varphi} 2\alpha_a(r) \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

де σ – питома електропровідність, φ – кут, r – радіус, j_{φ} – кутова компонента густини струму, яка визначається виразом

$$j_{\varphi} = \sigma Q_{\perp}(r) B(r) \frac{dT}{dr}. \quad (4)$$

А термоЕРС задається виразом

$$E = 2\pi r Q_{\perp}(r) B(r) \frac{dT}{dr}. \quad (5)$$

Термомагнітна добротність гіротропного матеріалу

$$Z_Q(r) = \frac{Q_{\perp}^2(r) B^2(r)}{\kappa \rho}. \quad (6)$$

Неоднорідність можна отримати змінюючи магнітне поле B в однорідному гіротропному середовищі, або створивши анізотропію коефіцієнта Нернста-Еттингсгаузена Q_{\perp} в кільці при

постійному магнітному полі B . Розглянемо випадок, коли в кільці змінюється магнітне поле B вздовж радіуса кільця, при постійному коефіцієнті Нернста-Еттингсгаузена Q_{\perp} .

Розв'язавши (3) з врахуванням (4) та (5) та врахувавши граничні умови, отримаємо вираз для ККД спірального гіротропного термоелемента в неоднорідному магнітному полі

$$\eta = \frac{1}{6} \frac{(1 \pm \sqrt{1 + 6Z_Q(T_1 - T_2)})^2}{6Z_Q(T_1 - T_2) - (1 \pm \sqrt{1 + 6Z_Q(T_1 - T_2)})^2 - 2Z_Q T_1 (1 \pm \sqrt{1 + 6Z_Q(T_1 - T_2)})} \quad (7)$$

де
$$Z_Q = \frac{Q_{\perp}^2 B^2(r)}{\kappa r}. \quad (8)$$

Використовуючи (6), (7) можна розрахувати ККД гіротропного спірального термоелемента в неоднорідному магнітному полі

Результати комп'ютерного моделювання

Для побудови комп'ютерної моделі гіротропного термоелемента спіральної форми використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [19]. Розрахунок розподілів температур в гіротропному термоелементі здійснювався методом скінченних елементів. За допомогою комп'ютерного моделювання було визначено розподіли температур для матеріалу $InSb$ в інтервалі температур 300 – 700 К та магнітному полі з індукцією $B = 1$ Тл.

На рис. 1 наведено температурні залежності добротності для термоелектричних матеріалів $InSb$, $InAs$ та Bi_2Te_3 . Видно, що кращим матеріалом для виготовлення генераторних гіротропних термоелементів є $InSb$, що узгоджується з експериментальними результатами, приведеними в роботі [1].

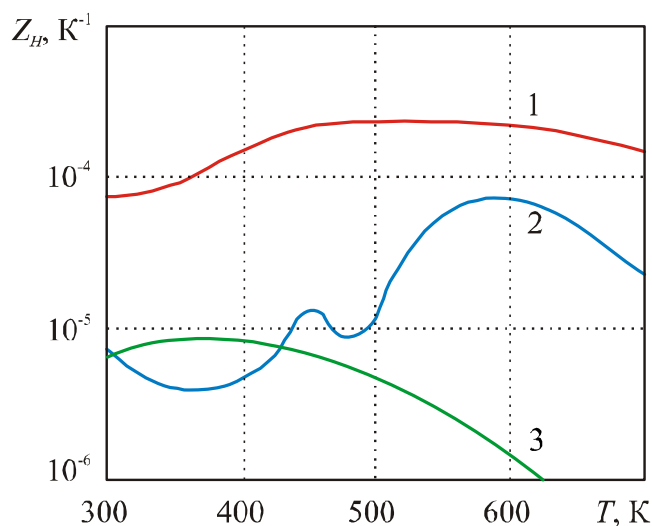


Рис. 1. Температурні залежності добротності термоелектричних матеріалів для гіротропних термоелементів (1 – $InSb$, 2 – $InAs$, 3 – Bi_2Te_3).

На рис. 2 наведено тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в спіральному гіротропному термоелементі.

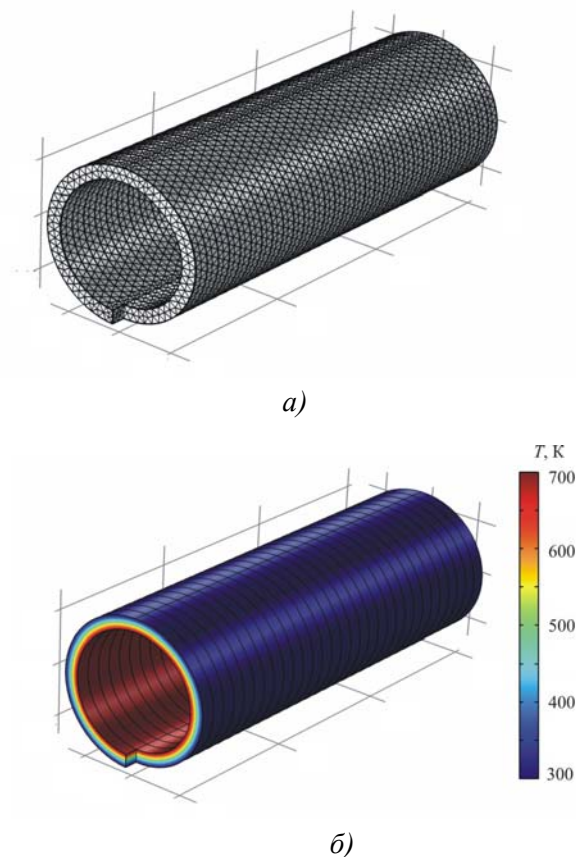


Рис. 2. Тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в гіротропному спіральному термоелементі.

За даними розрахунків побудовані залежності ККД від температури гарячої сторони термоелемента T_2 при постійній холодній стороні $T_1 = 300$ К для $InSb$ (рис. 3).

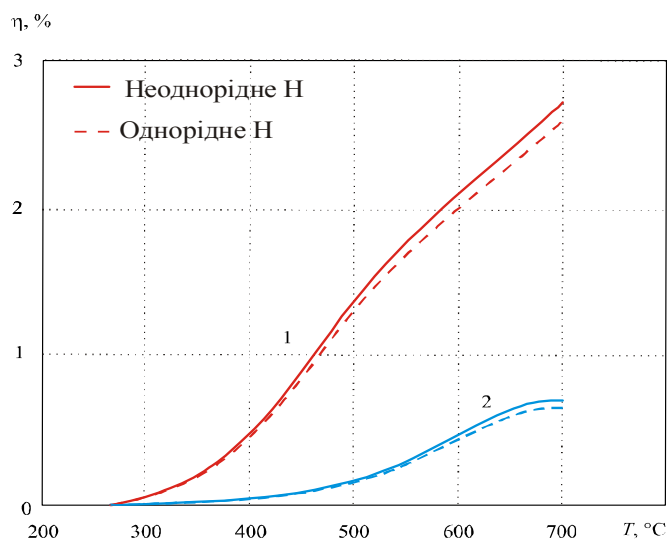


Рис. 3. Залежність ККД від температури для гіротропного термоелемента циліндричної форми (1 – $InSb$, 2 – $InAs$).

З рисунка видно, що використання неоднорідних магнітних полів в термоелементах спіральної форми більш ефективно. А спіральні термоелементи, робота яких заснована на збудженні вихрових термоелектричних струмів в однорідному гіротропному термоелектричному середовищі, дають можливість збільшувати термоелектричні напруги. Відрізняються від відомих термоелементів багатофункціональністю, вони є перспективними для використання як в спеціальних термогенераторах, так і в приладах вимірювальної техніки. Дослідження гіротропних термоелементів прямокутної та оптимальної форм так само показали збільшення ефективності у разі використання неоднорідного магнітного поля.

Висновки

1. Виконано порівняння параметрів термоелектричних матеріалів (*InSb*, *InAs* та *Bi₂Te₃*) для гіротропних термоелементів. Встановлено, що кращим матеріалом для виготовлення генераторних гіротропних термоелементів є *InSb*, середнє значення добротності якого в інтервалі температур 400 – 700 К в полі з магнітною індукцією 1 Тл становить приблизно $4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.
2. За допомогою комп'ютерного моделювання визначено розподіли температур у робочому тілі гіротропного термоелемента спіральної форми для термоелектричного матеріалу *InSb* та *InAs*.
3. Визначено температурні залежності ККД. Встановлено, що максимальне значення ККД гіротропного термоелемента спіральної форми для матеріалу *InSb* в інтервалі температур 300 – 700 К і магнітній індукції 1 Тл становить 2.75 %.

Література:

1. Анатычук. Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства Киев, Наукова думка. – 1979. 766 с.
2. Самойлович А.Г. Термоэлектрические и термомагнитные методы превращения энергии. – Черновцы: Рута, 2006. – 226 с.
3. Анатычук. Л.И. „Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии”. Киев, Черновцы: „Наукова думка”, 2003. – 386 с.
4. Самойлович А.Г., Коренблит Л.Л. Современное состояние теории термоэлектрических и термомагнитных явлений в полупроводниках //УФН. – 1953. – Т. 49, № 2. – С. 243 – 272.
5. Nakamura H., Ikeda K., Yamaguchi S. Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field. // XVI-th international conference on thermoelectrics, – Dresden, Germany. – 1997. – P. 142 – 146.
6. Анатичук Л.І., Лусте О.Я., Федорук Я.Г., Шинкарук С.М. Вихрові термоелектричні струми в гіротропному середовищі з радіальним розподілом температури // Термоелектрика. – 2004. – № 1. – С. 19 – 24.
7. Лусте О.Я., Федорук Я.Г. Гіротропний термоелемент в неоднорідному магнітному полі//Термоелектрика. – 2006. – №1. – С. 16 – 22.
8. Лусте О.Я., Федорук Я.Г. Оптимізація матеріалів для гіротропних термоелементів//Термоелектрика. – 2008. – №4. – С. 21 – 26.
9. Агаєв З. Ф., Арасли Д. Г., Алиев С. А. Термомагнітний перетворювач ІЧ-випромінювання. – Проблеми енергетики. – 2003. – № 3. – С. 12 – 21.
10. Немов С.А., Прошин В.І., Таранасов Г.Л., Парфен'єв Р.В., Шамшур Д.В., Черняев А.В. Поперечний ефект Нернста-Еттінгсгаузена, резонансне розсіяння та надпровідність у *SnTe*: In. – Фізика твердого тіла. – 2009. – Т. 51. – № 1. – С. 461 – 464.

11. Harman T.G., Honig J.M. Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications. – New York, Mc. Graw – Hill, 1967. – 377 p.
12. Nakamura H., Ikeda K. and Yamaguchi S. Transport coefficients of InSb in a strong magnetic field //Research report. NIFS series, Nagoya, Japan (1998). – 23 p.
13. Hiroaki Nakamura, Kazuaki Ikeda, Satarou Yamaguchi. Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field.// Proceedings of XVI International conference on Thermoelectrics. – Dresden (Germany). August 26-29, 1997. – P. 142 – 146.
14. Баранський П.І., Гайдар Г.П. Анізотропія термоелектричних властивостей багатодолінних напівпровідників кубічної симетрії під впливом зовнішніх спрямованих дій. – Термоелектрика, 2014, №1, ст. 13.
15. Goldsmid H.J., Volckmann E.H. Galvanomagnetic and thermoelectric measurements on polycrystalline //Proceedings of 16 Internatinal conference on Thermoelectrics. Dresden (Germany), August 26 – 29, 1997. – P. 142 – 146.
16. Anatyчук L.I., Vikhor L.N., Low-temperature Thermoelectric Cooling under Optimal Legs Inhomogeneity in the Optimal Nonuniform Magnetic Field, in Proceedings of the 16 International Conference on Thermoelectrics, Dresden, August 26-29, 1997. – P. 397 – 400.
17. Константинович І.А., Рендигевич О.В. Про ефективність гіротропних термоелементів в режимі генерації // Термоелектрика. – №1. – 2016. – С. 69-74.
18. Захарчук Т.В., Константинович І.А., Константинович А.В., Форбатюк А.В. Про ефективність спіральних гіротропних термоелементів у режимі охолодження// Термоелектрика №1. 2019. – С. 63-68.
19. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Надійшла до редакції

Н.А. Годованец¹,
І.А. Константинович канд. физ.-мат. наук, доцент^{1,2},
А.В. Константинович док. физ.-мат. наук, доцент²,
С.Д. Шугани¹

¹Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,
ул. Коцюбинского 2, ²Черновцы, 58012, Украина,

²Институт термоэлектричества НАН и Мон Украины,
ул. Науки 1, Черновцы, 58029, Украина
e-mail: dj_kneo@ukr.net; aconst@ukr.net;
i.konstantynovych@chnu.edu.ua

ГИРОТРОПНОГО ТЕРМОЭЛЕМЕНТ В ОДНОРИДНОМУТА НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

С помощью компьютерного моделирования определены распределения температур в рабочем теле гиروتропных термоэлементов в однородном и неоднородном магнитном поле.

Определены температурные зависимости КПД гиротропных термоэлементов в однородном и неоднородном магнитном поле. Установлено, что КПД генераторных гиротропных термоэлементов больше в неоднородном магнитном поле чем в однородном поле. Библ. 19, рис. 3.

Ключевые слова: коэффициент Нернста-Эттингсгаузена, гиротропный термоэлемент, неоднородное магнитное поле, термоэлектрический материал, термомагнитная добротность, КПД.

N.A. Godovanets¹,
I.A. Konstantynovych *cand. phys.– math. sciences, doцент^{1,2},*
A.V. Konstantynovych *doc. phys.– math. sciences, doцент²,*
S.D. Shugani¹

¹Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskyi Str.,
Chernivtsi, Ukraine, 58012

²Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;
e-mail: dj_kneo@ukr.net aconst@ukr.net
i.konstantynovych@chmu.edu.ua

GYROTROPIC THERMOELEMENT IN UNIFORM AND NON-UNIFORM MAGNETIC FIELDS

Using computer simulation, the temperature distributions in the working medium of gyrotropic thermoelements in uniform and non-uniform magnetic fields have been determined. Temperature dependences of the efficiency of gyrotropic thermoelements in uniform and non-uniform magnetic fields are determined. It has been established that the efficiency of generator gyrotropic thermoelements is higher in a non-uniform magnetic field than that in a uniform field.

Key words: Nernst-Ettingshausen coefficient, gyrotropic thermoelement, non-uniform magnetic field, thermoelectric material, thermomagnetic figure of merit, efficiency.

REFERENCES

1. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
2. Samoilovich A.G. (2006). *Termoelektricheskie i termomagnitnyie metody preobrazovaniia energii [Thermoelectric and thermomagnetic methods of energy conversion]*. Chernivtsi: Ruta [in Russian].
3. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. T.2. Termoelektricheskie preobrazovatelnyie energii [Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric energy converters]*. Kyiv, Chernivtsi: Naukova Dumka [in Russian].
4. Samoilovich A.G., Korenblit L.L. (1953). The current state of the theory of thermoelectric and thermomagnetic phenomena in semiconductors. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 49(2), 243 - 272.
5. Nakamura H., Ikeda K., Yamaguchi S. (1997). Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field. *Proc. of XVI International Conference on Thermoelectrics*. (Dresden, Germany, 1997, 142 – 146).
6. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Fedoruk Ya.G., Shinkaruk S.M. (2004). Eddy thermoelectric currents in a

- gyrotropic medium with radial temperature distribution. *J. Thermoelectricity*, 1, 19 - 24.
7. Luste O.Ya., Fedoruk Ya.G. Gyrotropic thermocouple in an non-uniform magnetic field // *Thermoelectricity*. - 2006. - №1. - P. 16 - 22.
 8. Luste O.J., Fedoruk Ya.G. (2008). Optimization of materials for gyrotropic thermoelements. *J. Thermoelectricity*, 4, 21 - 26.
 9. Agayev Z.F., Arasly D.G., Aliyev S.A. (2003). Thermomagnetic converter of IR radiation. *Energy Problems*, 3, 12 - 21.
 10. Nemov S.A., Proshin V.I., Tarantasov G.L., Parfenyev R.V., Shamshur D.V., Chernyaev A.V. (2009). Nernst-Ettingshausen transverse effect, resonant scattering and superconductivity in SnTe: In. *Solid State Physics*, 51(1), 461 - 464.
 11. Harman T.G., Honig J.M. (1967). *Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications*. New York, Mc. Graw - Hill.
 12. Nakamura H., Ikeda K. and Yamaguchi S. (1998). Transport coefficients of InSb in a strong magnetic field. Research report. *NIFS series (Nagoya, Japan)*.
 13. Hiroaki Nakamura, Kazuaki Ikeda, Satarou Yamaguchi. Transport coefficients of InSb in a strong magnetic field. (1997). *Proc. of XVI International conference on Thermoelectrics*. (Dresden, Germany, August 26-29, 1997).
 14. Baransky P.I., Gaidar G.P. (2014). Anisotropy of thermoelectric properties of multi-valley semiconductors of cubic symmetry under the influence of external directional effects. *J. Thermoelectricity*, 1, 13.
 15. Goldsmid H.J., Volckmann E.H. (1997). Galvanomagnetic and thermoelectric measurements on polycrystalline. *Proc. of 16 International Conference on Thermoelectrics* (Dresden, Germany, August 26 - 29, 1997).
 16. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N. (1997). Low-temperature thermoelectric cooling under optimal legs inhomogeneity in the optimal nonuniform magnetic field. In: *Proc. of the 16 International Conference on Thermoelectrics* (Dresden, August 26-29, 1997).
 17. Konstantinovich I.A., Rendigeovich O.V. (2016). On the efficiency of gyrotropic thermoelements in generation mode. *J. Thermoelectricity*, 1, 69-74.
 18. Zakharchuk T.V, Konstantinovich I.A., Konstantinovich A.V, Forbatyuk A.V. (2019). On the efficiency of spiral gyrotropic thermoelements in cooling mode. *J. Thermoelectricity*, 1, 63-68.
 19. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010).

Submitted

**Зільке Аугустин, Фрєліх Томас ,
Краф Гюнтер, Жан-Пьер Бергманн,
Гретцель Михаель, Геркен Ян Ансгар ,
Шмідт Кирил**

Технічний університет Ільменау, інститут технологічних
вимірювань і технології датчиків, 100565, 98684
Ільменау, Німеччина, e-mail: silke.augustin@tu-ilmenau.de

ПРОБЛЕМИ ВИМІРУ ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ РОТАЦІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ

Точне визначення температури технологічної зони набуває все більш важливу роль в процесі контролю і моніторингу ротаційного зварювання тертям. В даний час вимірювання температури здійснюється за допомогою вбудованого в інструмент давача температури (зазвичай термопари). Оскільки її не можна прикріпити безпосередньо до області з'єднання, розсіювання тепла всередині інструменту і в навколишнє середовище викликає відхилення в вимірах, а також затримку вимірювання температури в часі. У статті описано процес і пов'язані з ним проблеми. Показано, що пряме вимірювання температури в ході процесу може бути здійснене за рахунок використання термоелектричного ефекту між інструментом і деталлю без заміни інструменту шляхом введення додаткових давачів температури. Бібл. 12, рис. 7.

Ключові слова: ротаційне зварювання тертям, пряме вимірювання температури, ефект Зеебека, похибки вимірювання

Вступ

Ротаційне зварювання тертям (РЗТ) було розроблено і запатентовано Wayne Thomas в Інституті зварювання Великобританії в 1991. Воно належить до групи процесів твердотілого зварювання. На відміну від зварювання тертям, робочий принцип РЗТ заснований не на відносному переміщенні деталей, а на зносостійкості ротаційного інструменту. Одним з найбільш важливих параметрів процесу є осьове зусилля між інструментом та компонентом. Ця сила діє перпендикулярно напрямку зварювання і змушує інструмент повністю зануритися в зону з'єднання і залишатися в ній. Цей процес зварювання характеризується порівняно низькими температурами з'єднання нижче температури плавлення і чудовими механічними властивостями зварного шва в порівнянні з традиційними зварювальними процесами, такими як дугове і лазерне зварювання [1]. Ротаційне зварювання тертям використовується в авіакосмічній галузі, суднобудуванні, медицині та автомобілебудуванні. Однак проблеми можливого прямого вимірювання температури, заснованого на ефекті Зеебека, пов'язані зі швидкістю шпинделя зварювального інструменту і силами, що діють в процесі зварювання. Таким чином, необхідно висувати високі вимоги до конструкції вимірювального пристрою і постійної передачі електричної напруги [2]. Температура зони з'єднання під час процесу – це показник, який все більше піддається кількісній оцінці, оскільки дозволяє робити висновки про підведене тепло, і,

отже, про термомеханічну напругу у мікроструктурі [2–4]. В даний час температура вимірюється термографом або термопарами, вбудованими в зварювальний інструмент [5].

Однак останній метод дуже дорогий і неточний, оскільки термопара не стикається з точкою тертя між заплечиком інструменту та заготовкою. Крім того, в різних публікаціях повідомляється, що термопари були або зруйновані, або їх положення під час процесу зварювання змінилось, так що точне вимірювання температури було неможливе [3]. Відхилення в вимірах і тимчасові затримки можуть виникати через теплопровідність інструменту або теплопередачу в навколишнє середовище. Альтернативою введенню термопар в інструмент є метод «інструмент-деталь-термопара» (метод ІДТ), при якому виникає термоелектрична напруга, яка виникає між інструментом і деталлю, може бути виміряна, а потім перетворено в значення температури. Однак цей метод висуває високі вимоги до використовуваних схем вимірювання і експериментального визначення різних додаткових параметрів, оскільки вони які справляють визначальний вплив на похибку вимірювання температури. Далі на прикладі роботизованої системи ротаційного зварювання тертям описано застосування цього методу, а також представлено і обговорено досягнуті результати.

Основи вимірювання температури термопарами

Якщо існує різниця температур $T = T_1 - T_2$ на кінцях металевого провідника ($T_1 > T_2$), електрони на теплом кінці мають більш високу теплову енергію, ніж електрони на холодному кінці. В результаті відбувається дифузія електронів, яка є причиною виникнення різниці потенціалів E уздовж провідника.

$$E = \oint \frac{dU}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dx \quad (1)$$

Похідна $\frac{dU}{dT}$, яка характеризує диференціальну термоелектричну напругу U вздовж провідника, залежить від матеріалу і називається коефіцієнтом Зеебека $S(T)$ матеріалу. Абсолютну термоелектричну ЕРС провідника можна виміряти не безпосередньо, а лише відносно абсолютної термоелектричної ЕРС провідника з іншого матеріалу. Це можна пояснити впливом з'єднувальних проводів вольтметра (в основному мідних), які проходять від гарячого і холодного кінця провідника через невідоме температурне поле, створюючи додаткову невідому диференціальну термоелектричну ЕРС. Отже, два електричних провідника з відомими коефіцієнтами Зеебека з'єднуються, утворюючи термопарне вимірювальне коло. Фізична суть ефекту Зеебека (рис. 1), полягає в тому, що електричний струм генерується в контурі з двох різних провідників A і B , коли спаї цих провідників перебувають при різних температурах T_1 і T_2 .

Для вимірювання результуючої термоелектричної напруги замкнутий ланцюг розмикається в одній точці (рис. 3) і у розрив вмикається вольтметр. У найпростішому випадку, тобто за малих перепадів температур і однорідному коефіцієнті Зеебека по всій довжині провідника, вимірювана термоелектрична ЕРС визначається так:

$$U = (S_A - S_B) \cdot \Delta T \quad (2)$$

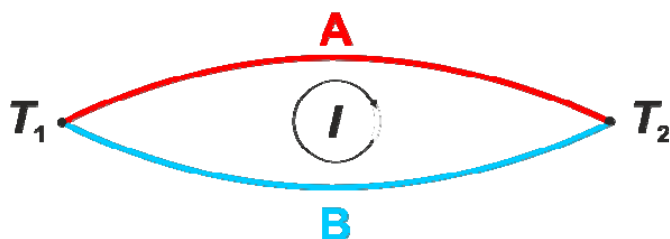


Рис. 1. Схематичне зображення ефекту Зеебека [6].

Довжина і поперечний переріз відповідних провідників в цьому випадку не відіграють ролі. Також можна припустити, що в неоднорідних провідниках зі сталими коефіцієнтами Зеебека по всій довжині провідника виникає термоелектричне напруга, яка залежить лише від різниці температур між двома спаями. Градієнти температури уздовж однорідних провідників не впливають на вимірювану термоЕРС, оскільки результуючі диференціальні парціальні напруги вздовж двох провідників компенсують одна одну. [6, 7]. З іншого боку, однак, додаткова термоелектричне напруга виникає при зміні коефіцієнта Зеебека, наприклад, внаслідок механічних або хімічних впливів на матеріал провідника, якщо зумовлені цими впливами неоднорідності в матеріалі провідника розташовані в зоні температурного градієнта [8, 9, 10].

Для основної схеми вимірювання температури за допомогою термопар, яка найчастіше використовується в техніці, ланцюг розмикається на спаї, а вольтметр підключається до розриву мідними дротами (рис. 2).

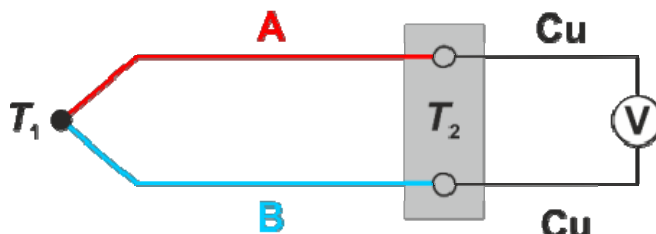


Рис. 2. Основна схема вимірювання температури термопарами.

Температура T_2 повинна бути відомою і незмінною протягом періоду вимірювання. При визначенні характеристичної кривої термопар, стандартизованих на міжнародному рівні, в якості опорної температури використовується температура T_2 , також відома, як температура еталонного спаю, $T_V = 0^\circ \text{C}$. Якщо температура цього холодного спаю відхиляється від 0°C , необхідно внести відповідну поправку при перетворенні термоелектричної напруги в температуру. Коли немає можливості підвести кабелі термопар до холодного спаю, на практиці використовуються компенсаційні або термоелектричні кабелі. Ці кабелі мають такі ж термоелектричними властивостями, як і кабелі для термопар, які використовуються в обмеженому діапазоні температур (приблизно до 200°C). В ідеалі при використанні компенсуючих кабелів не повинно виникати додаткових внесків у термоЕРС, навіть якщо вони знаходяться в зоні температурного градієнта. На практиці, однак, виникають додаткові внески в похибки вимірювання, які необхідно враховувати як складові підсумкової похибки вимірювання.

Проілюстрований основний принцип вимірювання температури за допомогою термопар можна також використовувати для прямого вимірювання температури між інструментами і деталями у виробничому устаткуванні [6].

Метод інструмент-деталь-термопара (ІДТ)

У даній статті пряме вимірювання електричного термоелектричного напруги між деталлю і інструментом досліджується на прикладі роботизованої системи ротаційного зварювання тертям (рис. 3). Середня температура реєструється по всій поверхні контакту між інструментом і деталлю.



Рис. 3. Основний принцип методу інструмент-деталь-термопара (ІДТ) [11]

По-перше, необхідно досліджувати, які термоелектричні або компенсуючі кабелі можуть бути підключені до двох основних елементів термоелектричного кола в зварювальному роботі, щоб утворилась термоелектричне коло, підключене до вимірювального пристрою. Слід очікувати, що в системі виникнуть пов'язані з технологічним процесом градієнти температури, які можуть викликати додаткові термоелектричні напруги між різними комбінаціями матеріалів. Production Technology Group [11] розробила систему для випробувань, адаптовану до роботизованої системи РЗТ (ротаційного зварювання тертям) (рис. 4 вище). Електрична напруга має зніматися безпосередньо з ротаційного інструменту і підводитись до термоелектричного кабелю. Система шліфування за допомогою електронних пристроїв ізолювалась від вимірювальної системи, щоб уникнути перешкод. Використовуваний інструмент для ротаційного зварювання тертям виготовляється із загартованої інструментальної сталі (1.2344), а з'єднувані цим шляхом заготовки складались з алюмінієвого сплаву EN AW 6060 T66 з товщиною листа 5 мм, довжиною 300 мм і шириною 50 мм. З'єднання деталей здійснювалося встик. Окремі компоненти, які передають термоелектричну напругу від зонда до мідного кабелю, зроблені з того ж матеріалу (1.2344), щоб не порушувати правила для термоелектричних ланцюгів.

Для наступних досліджень інструмент або заготовки для ротаційного зварювання тертям спочатку були доповнені термоелектричними кабелями для зняття термоелектричної напруги, виготовленими з тих же матеріалів, що інструмент і заготовка. До цих термоелектричних кабелів за схемою, аналогічною до базової схеми на рис. 2, було підключено мідні кабелі для передачі сигналу на вимірювальний прилад (рис. 4).

Ця конструкція вимагає, щоб еталонна точка термоелектричного кола розташовувалася в різних точках системи. Не гарантується, що температура еталонного спаяний в обох точках контакту з плином часу буде однаковою. Розсіювання тепла через термоелектричні лінії було заздалегідь оцінене для теплопровідності за допомогою аналітичних розрахунків і розраховане таким чином, щоб в кінцевому підсумку на еталонних спаях переважала така ж температура. При перших вимірах в системі температура еталонних спаяв контролювалася за допомогою

застосовуваних термопар для підтвердження раніше розрахованих мінімальних довжин. Вимірювання підтвердили правильність зроблених припущень, температура на еталонних спаях була однаковою.

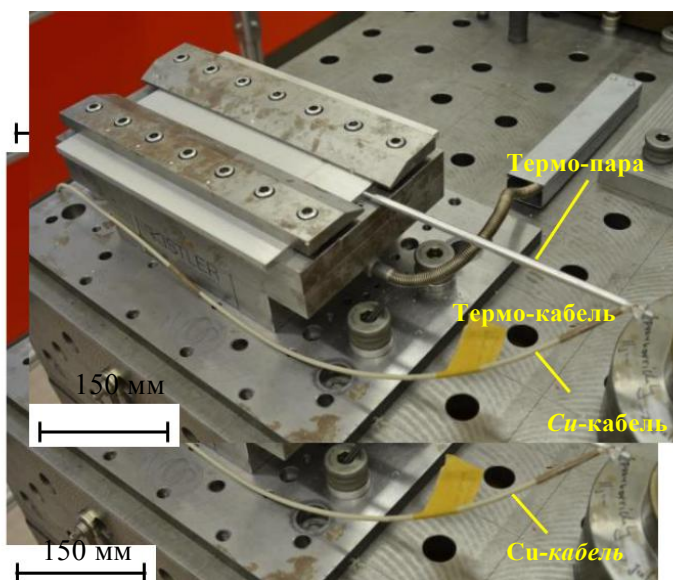
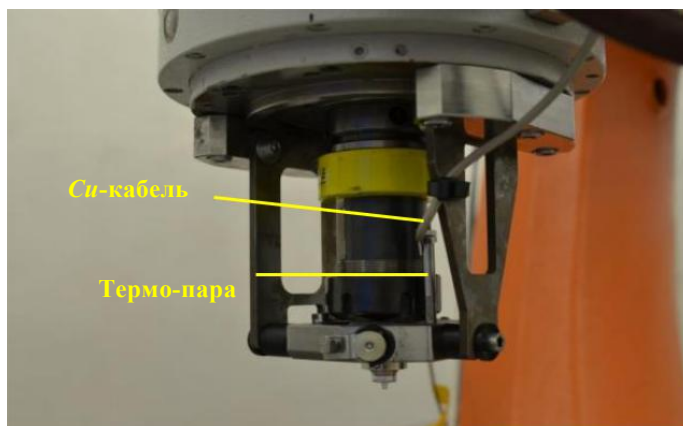


Рис. 4. Кріплення термального та мідного кабелю до інструменту (зверху) або тзаготовки (знизу)

Ця конструкція вимагає, щоб еталонна точка термоелектричного кола розташовувалася в різних точках системи. Не гарантується, що температура еталонного спаяний в обох точках контакту з плинм часу буде однаковою. Розсіювання тепла через термоелектричні лінії було заздалегідь оцінене для теплопровідності за допомогою аналітичних розрахунків і розраховане таким чином, щоб в кінцевому підсумку на еталонних спаях переважала така ж температура. При перших вимірах в системі температура еталонних спаїв контролювалася за допомогою застосовуваних термопар для підтвердження раніше розрахованих мінімальних довжин. Вимірювання підтвердили правильність зроблених припущень, температура на еталонних спаях була однаковою.

Результати

Калібрування комбінації матеріалів

Використовувана комбінація матеріалів з інструментальної сталі (1.2344) і алюмінієвого сплаву EN AW 6060 T66 не належить до міжнародних стандартизованих комбінацій матеріалів термопар. Тому спочатку була визначена T - U -характеристика або коефіцієнт Зеєбека пари матеріалів. Калібрування проводилася в термостатованому випробувальному стенді з використанням каліброваної термопари. На рис. 5 показані результати для комбінації матеріалів 1.2344 / EN AW 6060 T66.

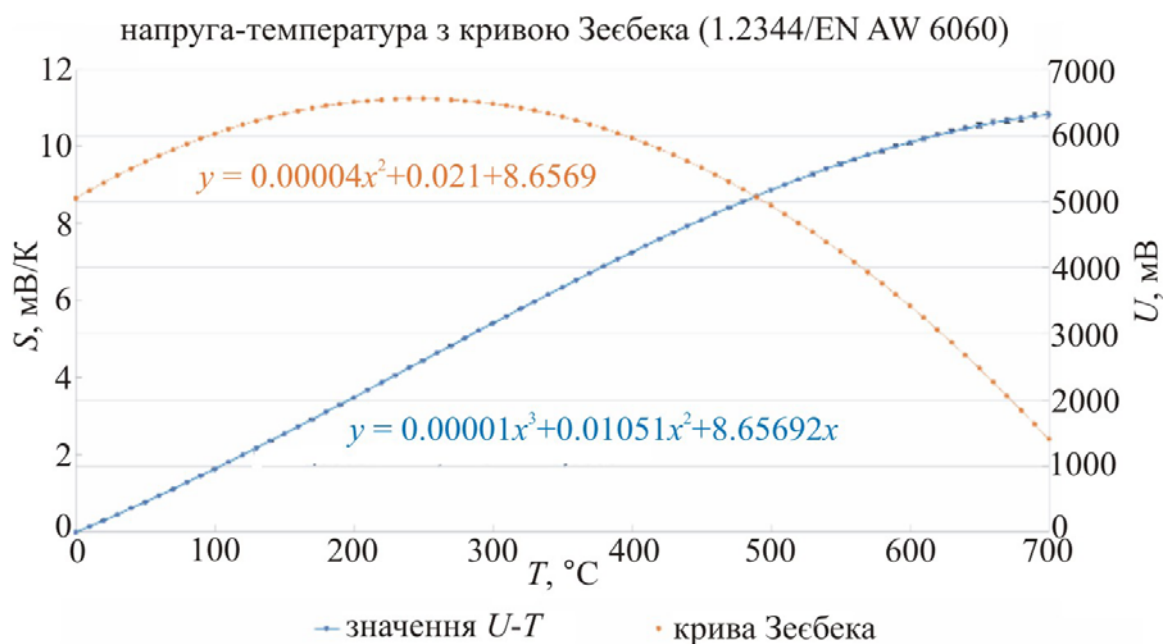


Рис. 5. Результат калібрування для 1.2344 і EN AW 6060 [11]

Ліва вісь ординат показує певний коефіцієнт Зеєбека (помаранчева крива), а протилежна - вісь термонапруги (синя крива). Коефіцієнт Зеєбека був визначений за допомогою спрощеного рівняння 2. Різниця температур в опорних точках становила 10 К. Результати були спочатку використані для розрахунку температур під час процесу зварювання, щоб довести придатність вимірювальної установки в цілому. Крива комбінації матеріалів повинна бути визначена більш точно в ході подальших випробувань в калібрувальній лабораторії Інституту технологічних вимірювань і сенсорної техніки.

Вимірювання на роботизованій установці ротаційного зварювання тертям

Експерименти з вимірювання температури проводяться на серійному кінематичному 6-осьовому роботі з шарнірнозчленованою рукою KUKA KR 500 MT 3. Робот оснащений модифікованим шпинделем РЗТ від MAG, який оснащений системою затискання інструменту для конусів з порожнистим хвостовиком (HSK. 63). Інструмент і деталь для ротаційного зварювання тертям були інтегровані в систему, як описано в розділі 3. Результуючі сили реєструються багатокомпонентним динамометром від KISTLER, який розташований під утримувачем компонентів (рис. 6).

Система працювала з такими параметрами зварювання:

- швидкість зварювання: 1000 мм/хв
- частота обертання: 5000 хв⁻¹
- осьове зусилля: 4000 Н
- діаметр заплечика: 13 мм
- діаметр зонда: 5 мм
- довжина зварного шва: 250 мм
- глибина врізання: 4.5 мм

Для підтвердження розрахункових температур на основі коефіцієнтів Зеебека, визначених під час калібрування, термопари типу К були вбудовані в центр зони зварювання (зона перемішування). Тому в заготовці були підготовлені канавки, в які без пошкоджень вставлялися термопари (рис. 6). Мета полягала в тому, щоб довести, що температура в зоні зварювання, виміряна за встановленою системою, була майже на тому ж рівні, що і у термопар. Термопари розташовувалися на 2 мм нижче поверхні зварювання в зазорі між деталями.

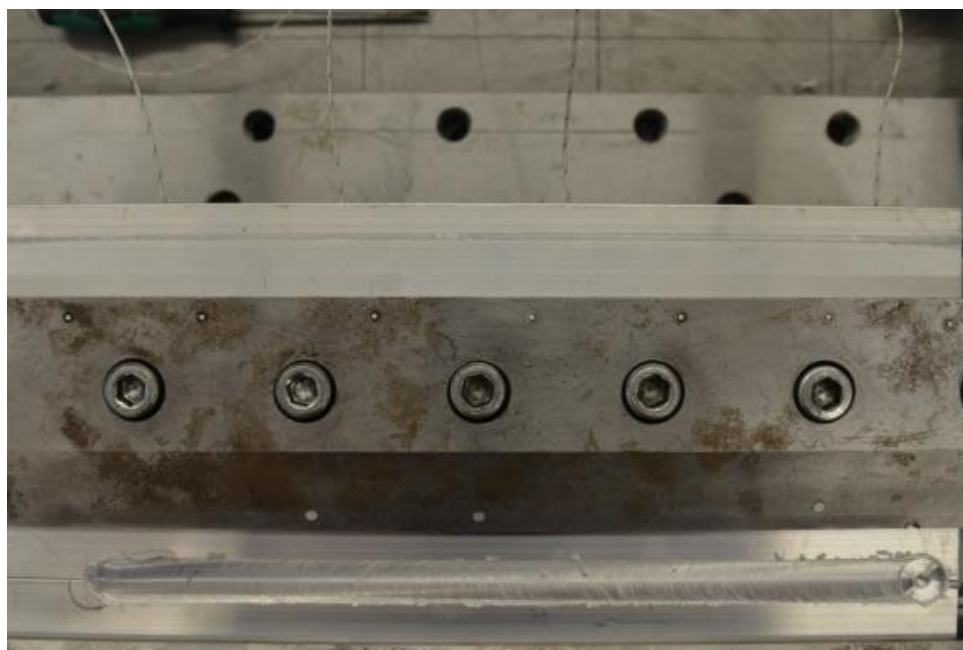


Рис. 6. Позіціонування термопар уздовж зварного шва (зліва TE1 - TE4)

Виміряні термоелектричні напруги фільтрувалися пасивним фільтром нижніх частот 1-го порядку 1 Гц. На рис. 7 показано збільшення температури (червона крива) та осьового зусилля (синя крива) комбінації матеріалів 1.2344 і EN AW 6060 T66 протягом всього часу зварювання. Можна чітко помітити, що температура підвищується під час фази занурення і досягає максимуму 450 ° С при приблизно 12 с. У той же час можна помітити зменшення осьового зусилля майже до 1000 Н, що пов'язано зі зменшенням межі текучості алюмінієвого сплаву.

Після того, як інструмент достатньо пластифікував матеріал деталі, контактна поверхня, на якій створюється термоелектрична напруга, збільшується. Через контакт зі ще холодним корпусом інструменту і пластифікованою деталлю можна визначити зниження температури приблизно на 125 ° С. Під час фази зварювання (починаючи з $t = 15$ с) осьове зусилля (4000 Н) і температура (близько 500 ° С) залишаються майже незмінними. Останній критерій відповідає

близько 75 % температури ліквідусу EN AW 6060 T66. Безпосередньо перед відведенням інструменту сила і температура короткочасно підвищуються, перш ніж зварювальний інструмент вийде із зони з'єднання. Це можна пояснити коротким часом очікування перед відведенням інструменту, в результаті чого відбувається зміна орієнтації шпинделя в залежності від процесу. Температурні криві термопар (TE1 - TE4), які також показані на рис. 7, слід використовувати для перевірки результатів прямого виміру термоелектричної напруги (позначається на схемі як Tweld_ThermV), завжди вказують на максимум нижче температурних кривих. Це може бути пов'язано як з розташуванням трохи нижче поверхні [7], так і з періодами затримки термопар. Після вимірювання було визначено, що термопара 3 не встановлена точно, що можна використовувати для обґрунтування відхилення температурної кривої, так і з періодами затримки термопар.

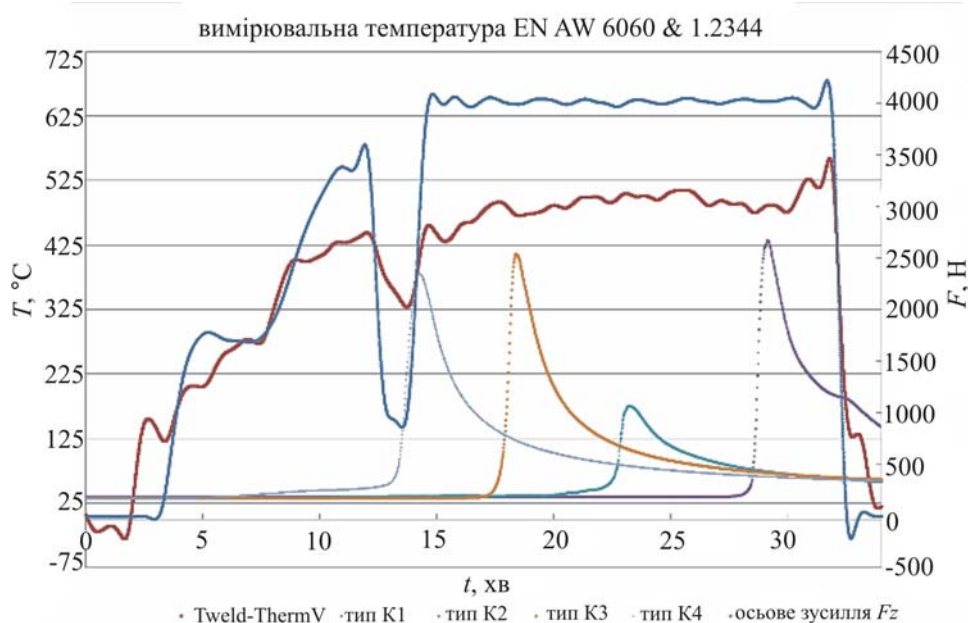


Рис. 7. Результати в процесі зварювання [11]

Також було помічено, що сигнали перешкод реєструються вже до і після зварювання, тобто в той час, коли термоелектричне коло розімкнене. В основному це пояснюється збурюючими змінними, наприклад частотою мережі 50 Гц (коректованою за допомогою фільтра нижніх частот), частотою обертання обертового шпинделя або пов'язане з системою навантаження ЕМС (електромагнітної сумісності). Отже, як значення отримані під час калібрування, так і результати, отримані в процесі зварювання, повинні підтверджуватися повторними вимірами.

Резюме і перспективи

Результати вимірювань, представлені в статті, показали, що пряме вимірювання температури може бути виконано з використанням методу ІДТ (інструмент-деталь-термопара). Градувальна характеристична крива була визначена для використовуваної комбінації матеріалів і застосована для вимірювання температури технологічної зони під час процесу з'єднання. Досягнуті вимірювальні значення калібрування повинні бути додатково підтверджені точної лабораторної калібруванням. Під час перших вимірів на роботизованому зварювальному роботі

РЗТ (ротаційної зварювання тертям) були виявлені наступні фактори впливу на результати вимірювань і їх похибка:

- похибка визначення характеристичної кривої,
- навантаження електромагнітної сумісності через периферії системи,
- знос зонда в процесі зварювання,
- ще не виявлені градієнти температури в області переходів матеріалів, що викликають додаткові термоелектричні напруги

В рамках майбутньої співпраці між Production Technology Group та Інститутом вимірювання технологічних процесів і сенсорної техніки в Технічному університеті Ільменау, можливості прямого виміру температури на основі ефекту Зеєбека як для ротаційної зварювання тертям, так і для інших зварювальних процесів повинні бути додатково досліджені і перевірені. Процеси теплопередачі також повинні бути заздалегідь розраховані за допомогою чисельного моделювання [12], а результати розрахунків згодом підтверджені за допомогою вимірювальної техніки.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують, що можливих фінансових чи інших конфліктів з приводу роботи немає.

Література

1. D. Schmid: Reibrührschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie, Dissertation, TU München, Herbert Utz Verlag GmbH, 2015.
2. A. Fehrenbacher, C. Smith, N. Duffie, N. Ferrier, F. Pfefferkorn, M. Zinn: Combined Temperature and Force Control for Robotic Friction Stir Welding, ASME, J. Manuf. Sci. Eng 136 (2), 021007 (Jan 15, 2014 року), Paper No: MANU-12-1357; DOI: 10.1115 / 1.4025912.
3. ACF Silva, J. De Backer, G. Bolmsjö: Temperature measurements during friction stir welding, University West, Trollhättan, Sweden, Springerlink.com, 2016. DOI 10.1007 / s00170-016-9007-4.
4. E. Cole, A. Fehrenbacher, N. Duffie, M. Zinn, F. Pfefferkorn, N. Ferrier: Weld temperature effects during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys 6061-t6 and 7075-t6, Int J Adv Manuf Technol (2014 року) 71: 643-652. DOI 10.1007 / s00170-013-5485-9.
5. A. Fehrenbacher, N. Duffie, N. Ferrier, F. Pfefferkorn, M. Zinn: Effects of tool-workpiece interface temperature on weld quality and quality improvements through temperature control in friction stir welding, The Int. Journ. Adv. Manuf. Techn., Vol. 71, pp. 165-179, 2014/03/01, 2014.
6. F. Bernhard (Hrsg.): Handbuch der Technischen Temperaturmessung, 2. Auflage, Springer-Verlag, 2014.
7. M. Javurek, A. Mittermair: Wo in einem Thermoelement herrscht die gemessene Temperatur? Analyse mittels FE- Simulation, Technisches Messen, Heft 11, 2016, De Gruyter Oldenbourg. DOI 10.1515 / teme-2016-0028.
8. P. Germanow: Messtechnische Untersuchung der Kennlinienstabilität von Thermoelementen, TU Ilmenau, Masterarbeit, 2019.
9. ES Webster: Low-Temperature Drift in MIMS Base-Metal Thermocouples, Springer Verlag, Int J Thermophys (2014 року) 35: 574-95. DOI 10.1007 / s10765-014-1581-9.

10. AD Greenen, ES Webster: Thermal Recovery from Cold-Working in Type K Bare-Wire Thermocouples, Springer Verlag, Int J Thermophys (2017) 38: 179. DOI 10.1007 / s10765-017-2316-5.
11. M. Baranowski, K. Schmidt, MK Stobrawa: Anwendung des Seebeck-Effekts zur Messung der Prozesszonentemperatur beim Reibrührschweißen, Dokumentation Projektseminar, TU Ilmenau, 2018.
12. MZH Khandkar, JA Khan, AP Reynolds: Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model, Sc. and Techn. of Welding & Joining, 8 (3): 165-174, 2003. DOI: 10.1179 / 136217103225010943

Надійшла до редакції 22.04.2020

**Зильке Аугустин,
Фрёліх Томас,
Крапф Гюнтер,
Жан-Пьер Бергманн,
Грэтцель Михаэль,
Геркен Ян Ансгар,
Шмидт Кирил**

Технический университет, Ильменау, Германия,
e-mail: silke.augustin@tu-ilmenau.de

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

Точное определение температуры технологической зоны приобретает все более важную роль в процессе контроля и мониторинга ротационной сварки трением. В настоящее время измерение температуры осуществляется с помощью встроенного в инструмент датчика температуры (обычно термопары). Поскольку их нельзя прикрепить непосредственно к области соединения, рассеяние тепла внутри инструмента и в окружающую среду вызывает отклонения в измерениях, а также задержку измерения температуры во времени. В статье описан процесс и связанные с ним проблемы, как прямое измерение температуры в ходе процесса может быть достигнуто за счет использования термоэлектрического эффекта между инструментом и деталью, без замены инструмента путем введения дополнительных датчиков температуры. Библ. 12, рис. 7.

Ключевые слова: ротационная сварка трением, прямое измерение температуры, эффект Зеебека, погрешности измерения

**Silke Augustin,
Thomas Fröhlich,
Gunter Krapf,
Jean-Pierre Bergmann,
Michael Grätzel,
Jan Ansgar Gerken,
Kiril Schmidt**

Technical University, Ilmenau, Germany,
e-mail: silke.augustin@tu-ilmenau.de

CHALLENGES OF TEMPERATURE MEASUREMENT DURING THE FRICTION STIR WELDING PROCESS

The exact determination of the process zone temperature can be considered as an increasingly important role in the control and monitoring of the friction stir welding process (FSW). At present, temperature measurement is carried out with the aid of a temperature sensor integrated into the tool (usually thermocouples). Since these cannot be attached directly to the joining area, heat dissipation within the tool and to the environment cause measurement deviations as well as a time delay in the temperature measurement. The article describes a process and the challenges that arise in this process, how a direct temperature measurement during the process can be achieved by exploiting the thermoelectric effect between tool and workpiece, without changing the tool by introducing additional temperature sensors. Bibl. 12, Fig. 7.

Keywords: Friction stir welding, Direct temperature measurement, Seebeck-Effect, Measurement errors

References

1. D. Schmid: Reibrührschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie, Dissertation, TU München, Herbert Utz Verlag GmbH, 2015.
2. A. Fehrenbacher, C. Smith, N. Duffie, N. Ferrier, F. Pfefferkorn, M. Zinn: Combined Temperature and Force Control for Robotic Friction Stir Welding, ASME, J. Manuf. Sci. Eng 136 (2), 021007 (Jan 15, 2014), Paper No: MANU-12-1357; DOI: 10.1115 / 1.4025912.
3. ACF Silva, J. De Backer, G. Bolmsjö: Temperature measurements during friction stir welding, University West, Trollhättan, Sweden, Springerlink.com, 2016. DOI 10.1007 / s00170-016-9007-4.
4. E. Cole, A. Fehrenbacher, N. Duffie, M. Zinn, F. Pfefferkorn, N. Ferrier: Weld temperature effects during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys 6061-t6 and 7075-t6, Int J Adv Manuf Technol (2014) 71: 643-652. DOI 10.1007 / s00170-013-5485-9.
5. A. Fehrenbacher, N. Duffie, N. Ferrier, F. Pfefferkorn, M. Zinn: Effects of tool-workpiece interface temperature on weld quality and quality improvements through temperature control in friction stir welding, The Int. Journ. Adv. Manuf. Techn., Vol. 71, pp. 165-179, 2014/03/01, 2014.
6. F. Bernhard (Hrsg.): Handbuch der Technischen Temperaturmessung, 2. Auflage, Springer-Verlag, 2014.

7. M. Javurek, A. Mittermair: Wo in einem Thermoelement herrscht die gemessene Temperatur? Analyse mittels FE- Simulation, Technisches Messen, Heft 11, 2016, De Gruyter Oldenbourg. DOI 10.1515 / teme-2016-0028.
8. P. Germanow: Messtechnische Untersuchung der Kennlinienstabilität von Thermoelementen, TU Ilmenau, Masterarbeit, 2019.
9. ES Webster: Low-Temperature Drift in MIMS Base-Metal Thermocouples, Springer Verlag, Int J Thermophys (2014) 35: 574-95. DOI 10.1007 / s10765-014-1581-9.
10. AD Greenen, ES Webster: Thermal Recovery from Cold-Working in Type K Bare-Wire Thermocouples, Springer Verlag, Int J Thermophys (2017) 38: 179. DOI 10.1007 / s10765-017-2316-5.
11. M. Baranowski, K. Schmidt, MK Stobrawa: Anwendung des Seebeck-Effekts zur Messung der Prozesszonentemperatur beim Reibrührschweißen, Dokumentation Projektseminar, TU Ilmenau, 2018.
12. MZH Khandkar, JA Khan, AP Reynolds: Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model, Sc. and Techn. of Welding & Joining, 8 (3): 165-174, 2003. DOI: 10.1179 / 136217103225010943.

Submitted 22.04.2020

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}
Кобилянський Р., *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}
Федорів Р.В.^{1,2}

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

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛІЧНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ НА ШКІРУ ЛЮДИНИ

У роботі наведено результати комп'ютерного моделювання циклічного температурного впливу на шкіру людини у динамічному режимі. Побудовано тривимірну комп'ютерну модель біологічної тканини з врахуванням теплофізичних процесів, кровообігу, теплообміну, процесів метаболізму та фазового переходу. Як приклад, розглянуто випадок, коли на поверхні шкіри знаходиться робочий інструмент, температура якого змінюється циклічно за наперед заданим законом у діапазоні температур $[50 \div +50]$ °С. Визначено розподіли температури у різних шарах шкіри людини в режимах охолодження та нагріву. Отримані результати дають можливість прогнозувати глибину промерзання і прогрівання біологічної тканини при заданому температурному впливі. Бібл., рис., табл.

Ключові слова: температурний вплив, шкіра людини, динамічний режим, комп'ютерне моделювання.

Вступ

Загальновідомим у медичній практиці є та обставина, що температурний вплив є важливим чинником лікування багатьох захворювань організму людини [1 – 3]. Однак, пристрої, що використовуються для цієї мети у більшості випадків громіздкі, без належних можливостей регулювання температури та відтворення термічних режимів. Для отримання понижених температур використовуються системи з рідким азотом [4 – 8], що значно обмежує можливості їх використання у лікувальних закладах, де забезпечення рідким азотом є проблематичним. Окрім цього, використання рідкого азоту або ефекту Джоуля-Томсона при розширенні газів не дозволяє здійснити точно необхідні температурні режими, що знижує в цілому ефективність використання холоду при лікуванні.

Вирішити цю проблему дає можливість застосування термоелектричного охолодження (нагріву) [3, 9 – 12]. Проведені протягом багатьох років дослідження теплового впливу на біологічну тканину, створення на їх основі термоелектричних приладів та використання у медичній практиці підтверджують їх ефективність. Термоелектричні пристрої є перспективними в таких галузях медицини, як кріотерапія, кріохірургія, офтальмологія, травматологія, нейрохірургія, пластична хірургія, урологія, дерматологія тощо [1 – 3].

Однак, досвід використання термоелектричних медичних приладів виявив і ряд їх недоліків. Серед них найважливішими є відсутність можливості керування у часі процесами охолодження та нагріву. Останнє істотно звужує можливості лікування теплом та холодом.

Дослідження показують, що темпи охолодження (їх динаміка) відіграють вирішальну роль при лікуванні [7, 13 – 25]. Так дуже швидке охолодження взагалі не призводять до деструкції біологічних тканин. Навпаки, помірне, але циклічне охолодження сприяє енергійній деструкції пухлин. Часові функції охолодження і нагріву є важливими і при лікуванні інших захворювань.

Отже, загальна проблема полягає у тому, щоб розробити фундаментальні наукові основи для створення термоелектричних медичних приладів нового покоління, якими відтворюються у біологічній тканині задані функції охолодження та нагріву. У більшості випадків контролювати циклічні процеси охолодження і нагріву біологічної тканини дуже складно [26, 27], тому необхідно навчитися прогнозувати глибину промерзання і прогрівання шарів шкіри при заданому температурному впливі в різні моменти часу.

Отже, метою даної роботи є визначення за допомогою комп'ютерного моделювання розподілів температур у різних шарах шкіри людини у динамічному режимі при заданому циклічному температурному впливі.

Фізична модель

Згідно фізичної 2D моделі з осьовою симетрією (рис.1) ділянка біологічної тканини тіла людини представляє собою структуру із трьох шарів шкіри (епідерміс 1, дерміс 2, підшкірний шар 3) і внутрішньої біологічної тканини 4 та характеризується наступними теплофізичними властивостями [28 – 34]: теплопровідністю κ_i , питомою теплоємністю C_i , густиною ρ_i , швидкістю перфузії крові ω_{bi} , густиною крові ρ_b , температурою крові T_b , теплоємністю крові C_b і питомим тепловиділенням Q_{meti} внаслідок процесів метаболізму та прихованою теплотою фазового переходу L . Теплофізичні властивості шкіри та біологічної тканини тіла людини в нормальному [35-39] та замороженому станах [40, 41] наведені в таблицях 1, 2. Відповідні шари біологічної тканини 1-4 розглядаються як об'ємні джерела тепла q_i , де:

$$q_i = Q_{meti} + \rho_b \cdot C_b \cdot \omega_{bi} \cdot (T_b - T), \quad i = 1..4. \quad (1)$$

Геометричні розміри кожного такого шару 1-4 складають a_i , b_i . На поверхні шкіри знаходиться круглої форми робочий інструмент 5, геометричні розміри якого наступні: товщина $d = 1$ мм і діаметр $c = 10$ мм. Згідно медичних рекомендацій та аналізу відомих кріозондів, що використовуються для кріодеструкції, визначено, що діаметр таких зондів становить від 5 мм до 15 мм [42, 43]. Тому в даній роботі, як приклад, взято середнє значення діаметру зонда, що складає $c = 10$ мм. Температури на границях відповідних шарів 1-4 та робочого інструменту 5 складають T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 . Температура всередині біологічної тканини складає $T_1 = +37^\circ\text{C}$. Температура робочого інструменту змінюється у діапазоні – $T_7 = [-50 \div +50]^\circ\text{C}$. Температура оточуючого середовища становить $T_8 = +22^\circ\text{C}$. Поверхня шкіри людини з температурою T_6 перебуває в стані теплообміну з оточуючим середовищем (коефіцієнт теплообміну α та коефіцієнт випромінювання ϵ) при температурі T_8 . Бокова поверхня шкіри адіабатично ізольована.

У даній моделі не враховано тепловий контактний опір між робочим інструментом і шкірою людини, оскільки за оцінками він незначний і становить $R_c = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ [44].

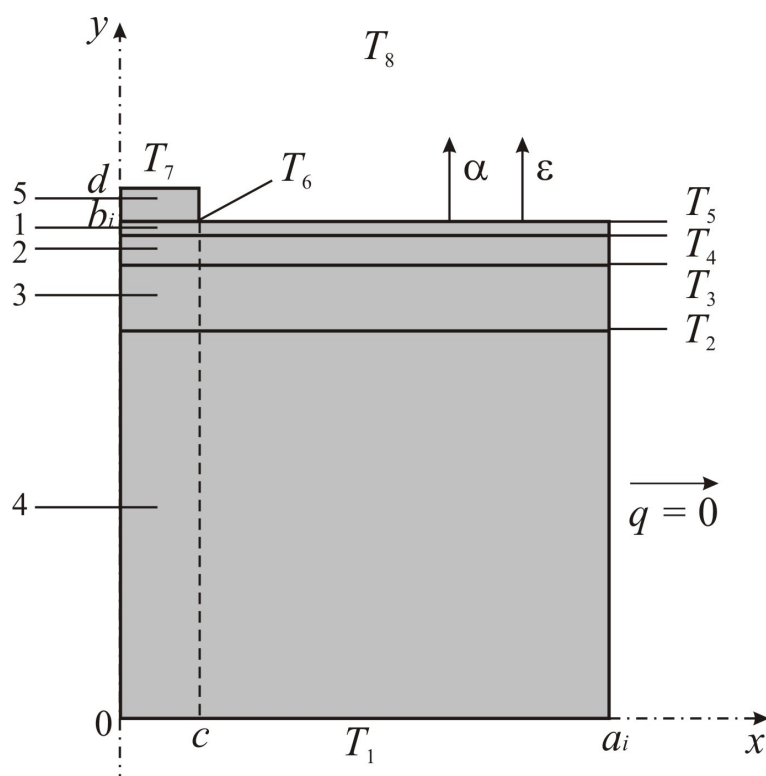


Рис. 1. Фізична 2D модель шкіри людини з осью симетрії:
 1 – епідерміс, 2 – дерміс, 3 – підшкірний шар,
 4 – внутрішня біологічна тканина, 5 – робочий інструмент

Таблиця 1

Термофізичні властивості біологічної тканини тіла людини [35 – 39]

Шари біологічної тканини	Епідерміс	Дерміс	Підшкірний шар	Внутрішня тканина
Товщина, l (мм)	0.08	2	10	30
Питома теплоємність, C (Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹)	3590	3300	2500	4000
Теплопровідність, κ (Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹)	0.24	0.45	0.19	0.5
Густина, ρ (кг·м ⁻³)	1200	1200	1000	1000
Метаболізм, Q_{met} (Вт/м ³)	368	368	368	368
Швидкість перфузії крові, ω_b (мл/с·мл)	0	0.0005	0.0005	0.0005
Густина крові, ρ_b (кг·м ⁻³)	1060	1060	1060	1060
Теплоємність крові, C_b (Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹)	3770	3770	3770	3770

Таблиця 2

Теплофізичні властивості біологічної тканини тіла людини
в нормальному та замороженому станах [40, 41]

Теплофізичні властивості біологічної тканини	Значення	Одиниці вимірювань
Теплоємність нормальної біологічної тканини (C_1)	3600	Дж/м ³ °С
Теплоємність замороженої біологічної тканини (C_2)	1800	Дж/м ³ °С
Теплопровідність нормальної біологічної тканини (κ_1)	0,5	Вт/м°С
Теплопровідність замороженої біологічної тканини (κ_2)	2	Вт/м°С
Прихована теплота фазового переходу (L)	$250 \cdot 10^3$	Дж/м ³
Верхня температура фазового переходу (T_1)	-1	°С
Нижня температура фазового переходу (T_2)	-8	°С

Математична модель

У загальному вигляді рівняння теплообміну в біологічній тканині має наступний вигляд [45]:

$$C_i \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa_i \cdot \nabla T) + \rho_b \cdot C_b \cdot \omega_{bi} \cdot (T_b - T) + Q_{meti}, \quad i = 1..4, \quad (2)$$

де C_i , κ_i – питома теплоємність і теплопровідність відповідних шарів шкіри, ρ_b – густина крові, C_b – питома теплоємність крові, ω_{bi} – перфузія крові відповідних шарів, T_b – температура крові, T – температура біологічної тканини; Q_{meti} – тепло, що виділяється внаслідок процесів метаболізму в кожному шарі.

Доданок у лівій частині рівняння (2) представляє собою швидкість зміни теплової енергії, що міститься в одиниці об'єму біологічної тканини. Три доданки у правій частині цього рівняння являють собою відповідно швидкість зміни теплової енергії за рахунок теплопровідності, перфузії крові та тепла метаболізму.

Рівняння теплообміну в біологічній тканині (2) розв'язується з відповідними граничними умовами. Температура на поверхні робочого інструменту змінюється за заданим законом у діапазоні температур $T_7 = [-50 \div +50]$ °С. Всередині біологічної тканини температура $T_1 = +37$ °С. Бокові поверхні біологічної тканини адіабатично ізольовані ($q = 0$), а верхня поверхня шкіри знаходиться у стані теплообміну (коефіцієнт теплообміну α та коефіцієнт випромінювання ε) з оточуючим середовищем при температурі T_8 .

$$q_i(x, y, t) \Big|_{\substack{c \leq x \leq a \\ y = b}} = \alpha \cdot (T_8 - T_5) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_8^4 - T_5^4), \quad (3)$$

де $q_i(x,y,t)$ – густина теплового потоку i -го шару шкіри людини, α – коефіцієнт конвективного теплообміну поверхні шкіри з оточуючим середовищем, ε – коефіцієнт випромінювання, σ – стала Больцмана, T_5 – температура поверхні шкіри людини, T_8 – температура оточуючого середовища ($T_8=+22^\circ\text{C}$).

У початковий момент часу $t=0$ с вважається, що температура у всьому об'ємі шкіри становить $T = +37^\circ\text{C}$, тобто початкові умови для розв'язання рівняння (2) наступні:

$$T_i(x,y,0) = T_b, \quad i = 1, \dots, 4. \quad (4)$$

У результаті розв'язання початково-крайової задачі (2)-(4) визначаються розподіли температури $T_i(x,y,t)$ і теплових потоків $q_i(x,y,t)$ у відповідних шарах шкіри у довільний момент часу. Як приклад, у даній роботі розглянуто випадок, у якому температура робочого інструменту змінюється за заданим законом у діапазоні температур $T_7 = [-50 \div +50]^\circ\text{C}$. Однак, слід зазначити, що запропонована методика дозволяє розглянути випадки, коли температура робочого інструменту $T_f(t)$ змінюється в будь-якому діапазоні температур або згідно наперед заданої функції.

У процесі заморожування клітини будуть проходити зміну фази в точці замерзання, при цьому матимуть місце втрати теплоти фазового переходу (L) і температура в цих клітинах не змінюватиметься. Фазовий перехід в біологічних клітинах відбувається в діапазоні температур $(-1 \div -8)^\circ\text{C}$. Властивості шкіри та біологічної тканини в нормальному та замороженому станах наведені в таблицях 1, 2 [35 – 41]. В інтервалі температур $(-1 \div -8)^\circ\text{C}$, коли клітини заморожуються, поглинається теплота фазового переходу, що може бути змодельоване додаванням відповідної величини до теплоємності [40, 41].

При заморожуванні шкіри людини відбувається звуження судин у капілярах до заморожування всієї крові в капілярах, і значення ω_{bi} прямує до нуля. Крім того, клітини не зможуть генерувати метаболічне тепло при заморожуванні і Q_{meti} буде рівним нулю при температурі нижчій нуля.

У замороженому стані властивості шкіри та біологічної тканини будуть мати наступні значення (5)-(8):

$$C_i = \begin{cases} C_1 & T \geq -1^\circ\text{C} \\ \frac{L}{-1 - (-8)} + \frac{C_1 + C_2}{2} & -8^\circ\text{C} \leq T \leq -1^\circ\text{C} \\ C_2 & T \leq -8^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

$$\kappa_i = \begin{cases} \kappa_1 & T \geq -1^\circ\text{C} \\ \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2} & -8^\circ\text{C} \leq T \leq -1^\circ\text{C} \\ \kappa_2 & T \leq -8^\circ\text{C} \end{cases} \quad (6)$$

$$Q_{meti} = \begin{cases} 368 & T \geq -1^\circ\text{C} \\ 0 & -8^\circ\text{C} \leq T \leq -1^\circ\text{C} \\ 0 & T \leq -8^\circ\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega_{bi} = \begin{cases} 0,0005 & T \geq -1^\circ\text{C} \\ 0 & -8^\circ\text{C} \leq T \leq -1^\circ\text{C} \\ 0 & T \leq -8^\circ\text{C} \end{cases} \quad (8)$$

Комп'ютерна модель

Було створено тривимірну комп'ютерну модель біологічної тканини у циліндричній системі координат, на поверхні якої знаходиться медичний робочий інструмент. Для побудови комп'ютерної моделі використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [46], що дає можливість проводити моделювання теплофізичних процесів у біологічній тканині з врахуванням кровообігу, теплообміну, процесів метаболізму та фазового переходу.

Розрахунок розподілів температур та густини теплових потоків у біологічній тканині здійснювався методом скінченних елементів, суть якого полягає в тому, що досліджуваний об'єкт розбивається на велику кількість скінченних елементів і в кожному з них шукається значення функції, яке задовольняє заданим диференціальним рівнянням другого порядку з відповідними граничними умовами. Точність розв'язання поставленої задачі залежить від рівня розбиття і забезпечується використанням великої кількості скінченних елементів [46].

Як приклад, на рис. 3-10 наведено розподіли температури та ізотермічних поверхонь в об'ємі шкіри людини, на поверхні якої розміщено робочий інструмент, температура якого змінюється циклічно за наперед заданим законом у діапазоні температур $[-50 \div +50]^\circ\text{C}$ у різні моменти часу.

Результати комп'ютерного моделювання циклічного температурного впливу на шкіру людини у динамічному режимі

Згідно відомих методик проведення кріодеструкції та коагуляції біологічної тканини [7, 13, 18-20] швидкість охолодження повинна становити не менше $(40-50)^\circ\text{C}/\text{хв}$, а швидкість нагріву $(20-25)^\circ\text{C}/\text{хв}$. Тому в даній роботі, як приклад, розглянуто випадок, у якому температура робочого інструменту $T_f(t)$ змінюється в діапазоні робочих температур $[-50 \div +50]^\circ\text{C}$ наступним чином: спочатку охолодженим робочим інструментом проводиться кріодеструкція шкіри при температурі $T=-50^\circ\text{C}$ протягом $t=120$ с, потім температура робочого інструменту змінюється від -50°C до $+50^\circ\text{C}$ протягом наступних 240 с, після цього нагрітим робочим інструментом проводиться коагуляція шкіри при температурі $T=+50^\circ\text{C}$ протягом $t=120$ с, наступне зниження температури до $T=-50^\circ\text{C}$ відбувається протягом 120 с, потім такий температурний вплив повторюється циклічно для досягнення кращої деструкції шкіри людини. Вказаний циклічний температурний вплив на шкіру людини представлено на рис. 2.

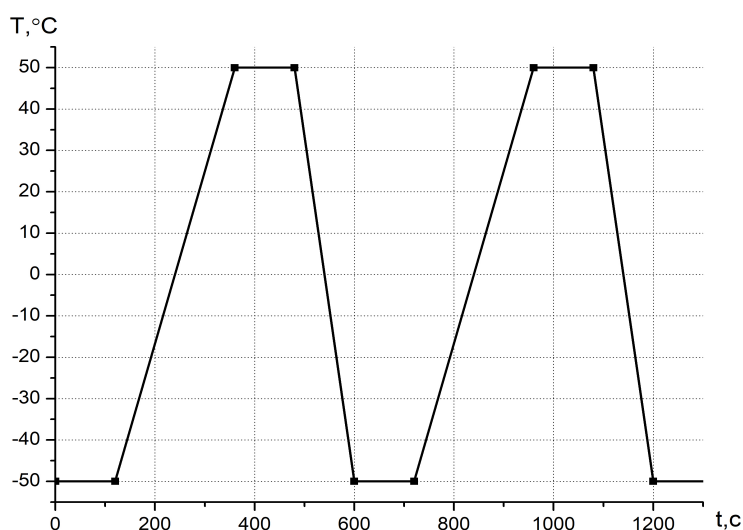


Рис. 2. Графік залежності температури робочого інструменту від часу.

На рис.3-10 наведено розподіли температури та ізотермічних поверхонь в поперечному розрізі біологічної тканини, на поверхні якої розміщено робочий інструмент, температура якого змінюється за вказаним вище законом у діапазоні робочих температур $[-50 \div +50]^{\circ}\text{C}$ у початковий та кінцевий моменти часу циклу охолодження-нагріву.

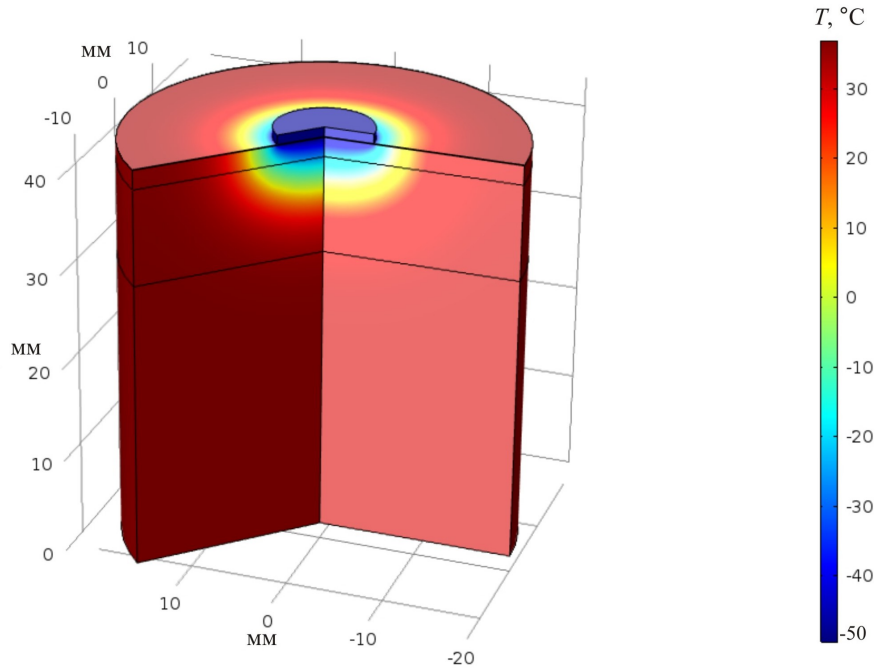


Рис. 3. Розподіл температури в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі $T=-50^{\circ}\text{C}$ в момент часу $t=120\text{ с}$.

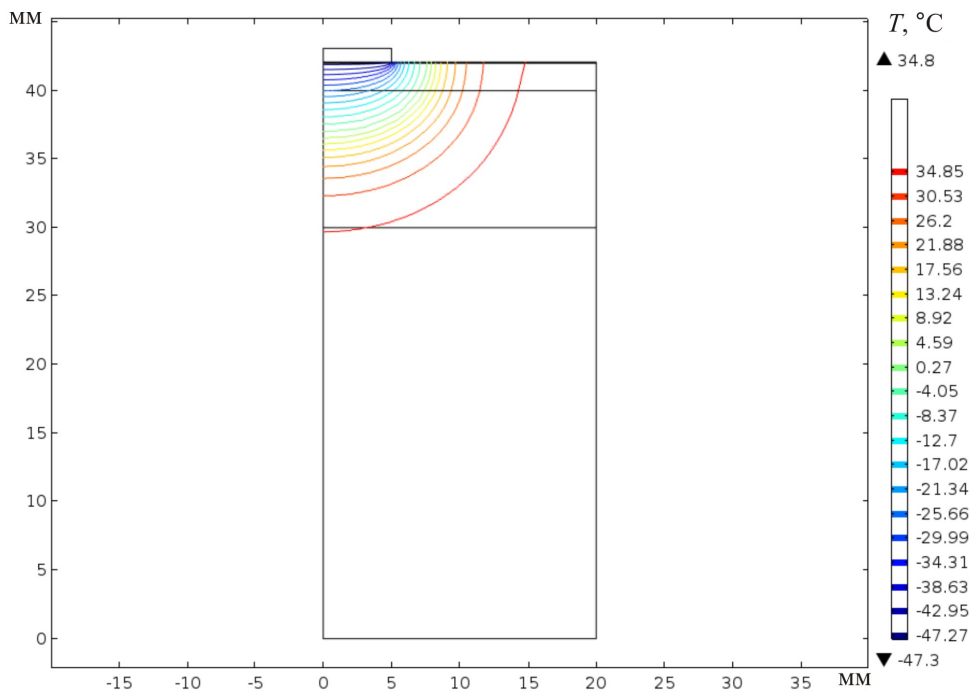


Рис. 4. Розподіл ізотермічних поверхонь в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі $T=-50^{\circ}\text{C}$ в момент часу $t=120\text{ с}$.

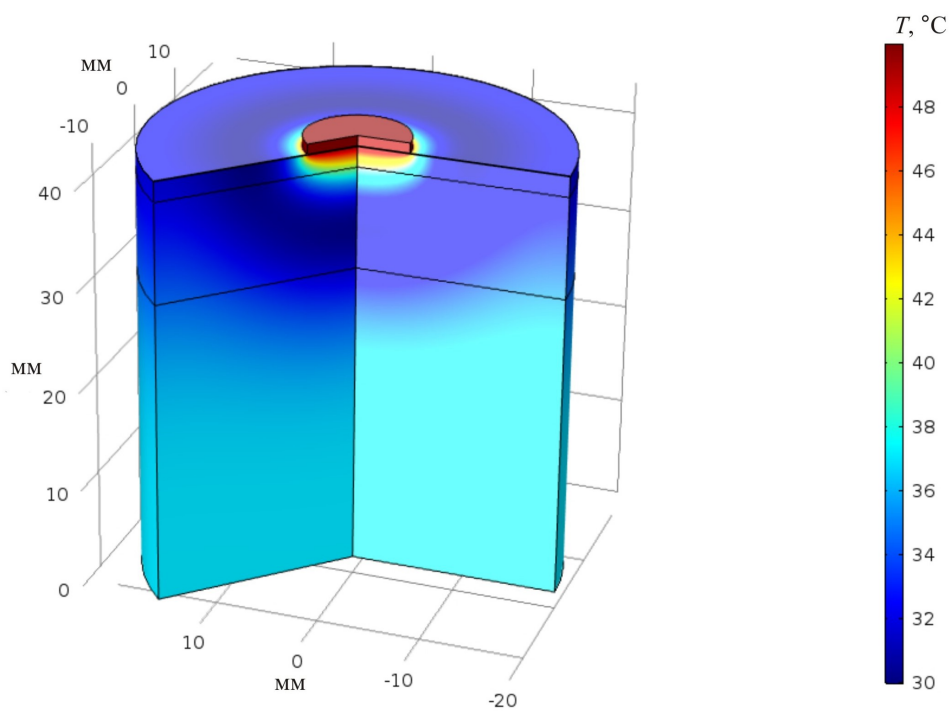


Рис. 5. Розподіл температури в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі $T=+50^{\circ}\text{C}$ в момент часу $t=480$ с.

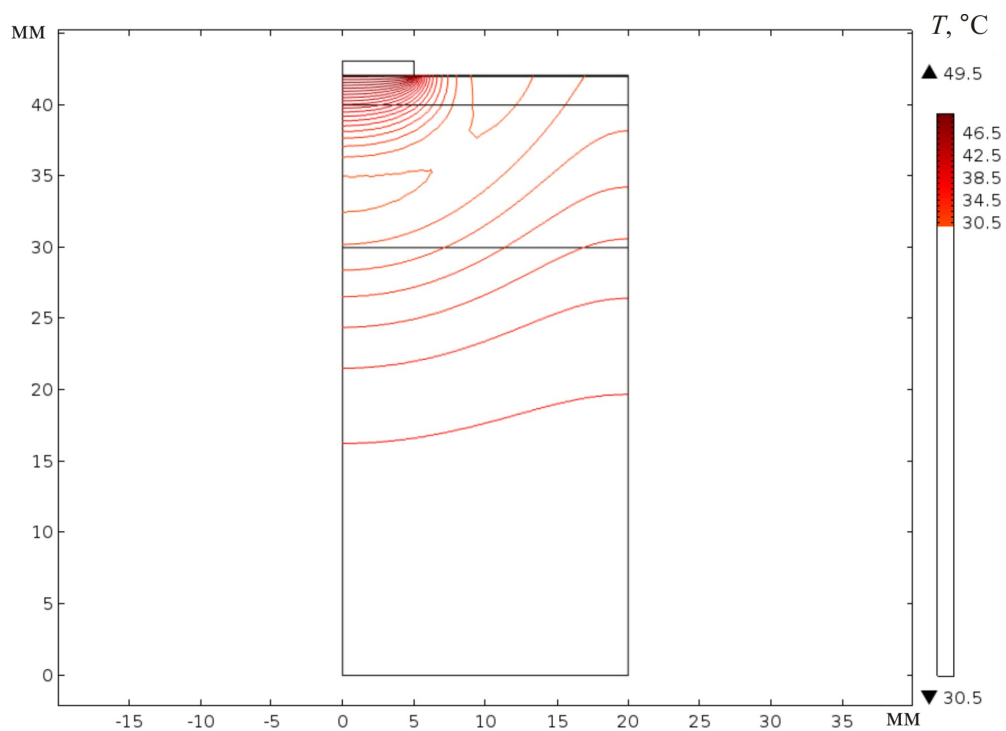


Рис. 6. Розподіл ізотермічних поверхонь в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі

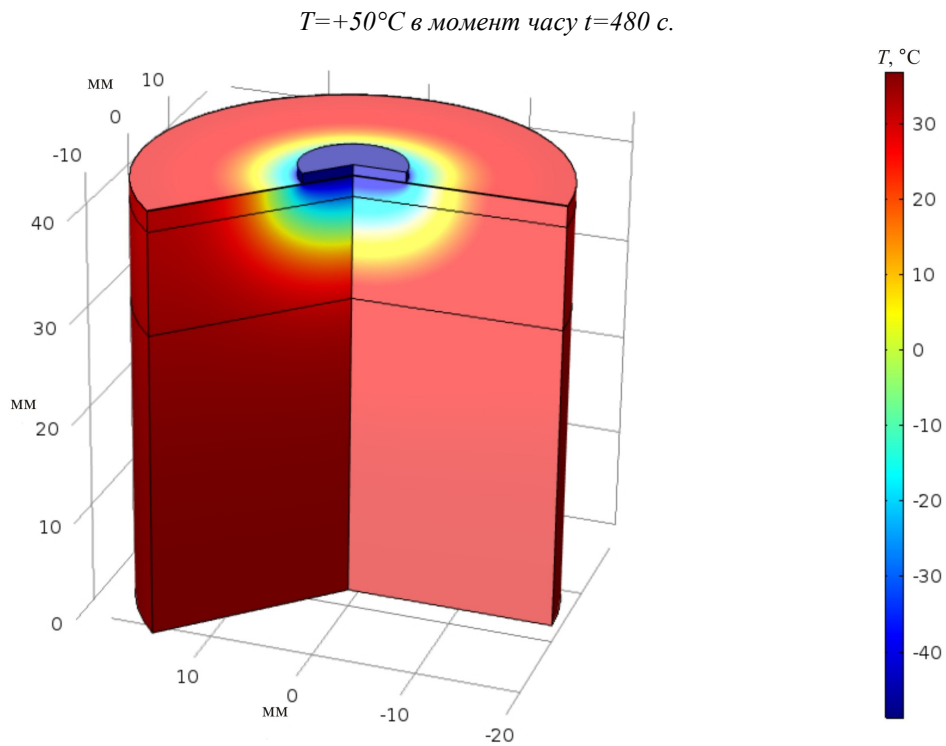


Рис. 7. Розподіл температури в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі $T=-50^{\circ}\text{C}$ в момент часу $t=720\text{ с.}$

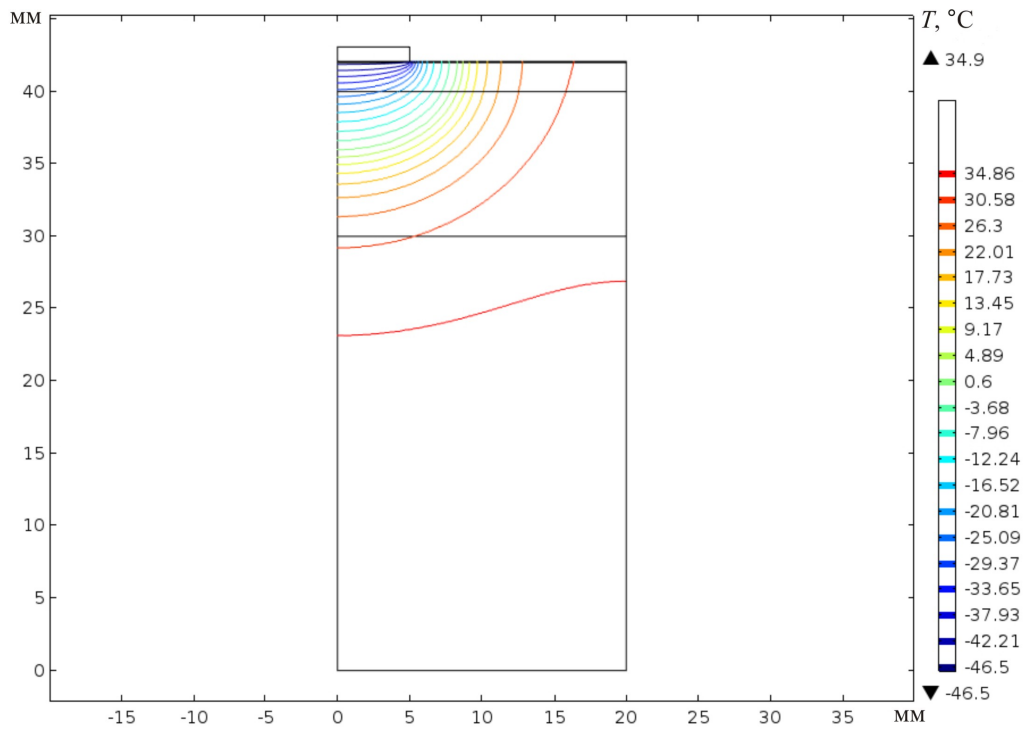


Рис. 8. Розподіл ізотермічних поверхонь в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі $T=-50^{\circ}\text{C}$ в момент часу $t=720\text{ с.}$

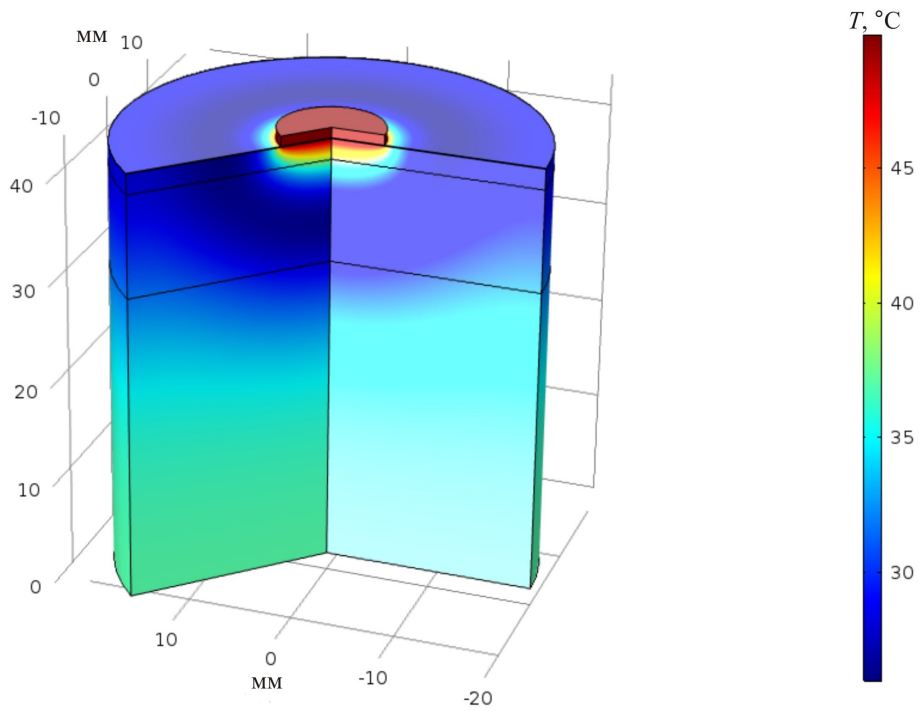


Рис. 9. Розподіл температури в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі $T=+50^\circ\text{C}$ в момент часу $t=1080$ с.

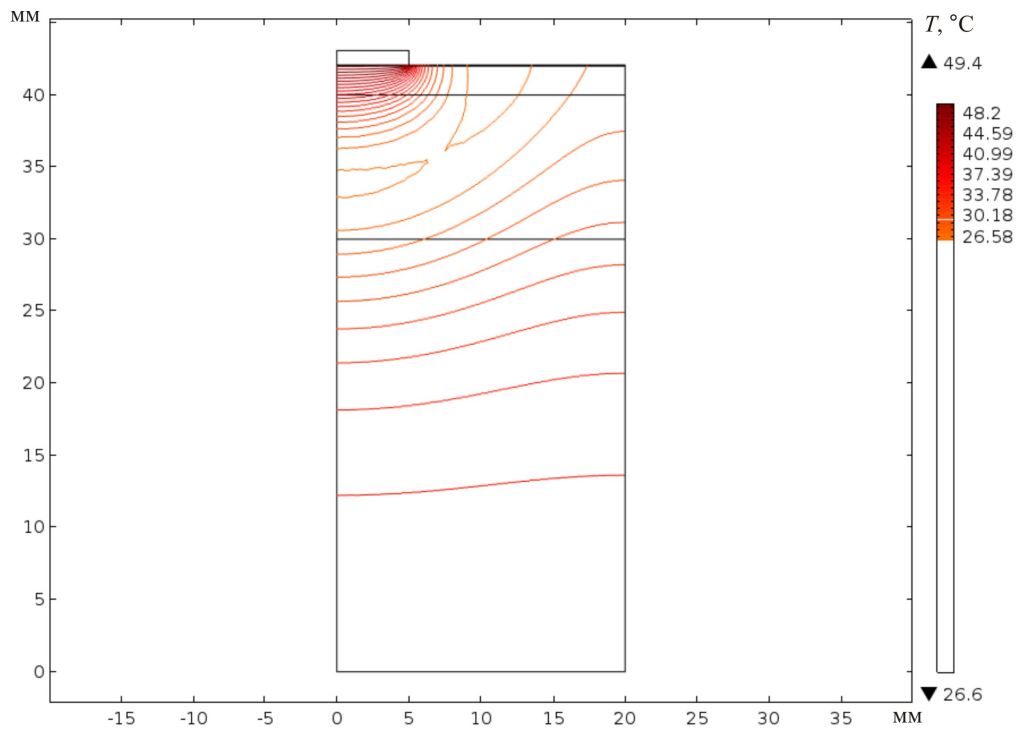


Рис. 10. Розподіл ізотермічних поверхонь в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі $T=+50^\circ\text{C}$ в момент часу $t=1080$ с

З рис. 3-6 видно, що при $t = 120$ с епідерміс охолоджується до температури -48.9°C , на границі епідерміс-дерміс температура рівна -48.3°C , на границі дерміс-підшкірно-жирова клітковина температура складає -25.5°C . А при $t = 480$ с температура у епідермісі підвищується до $+49.8^{\circ}\text{C}$, на границі епідерміс-дерміс температура рівна $+49.5^{\circ}\text{C}$, на границі дерміс-підшкірно-жирова клітковина температура складає $+40.3^{\circ}\text{C}$. Оскільки, верхній шар шкіри (епідерміс) має найменшу товщину і перфузія крові у ньому $\omega_b = 0$, то температура всередині цього шару близька до температури робочого інструменту. У подальшому при повторному циклічному температурному впливі (рис. 7-10) спостерігається, що при $t = 720$ с після охолодження температура всередині шкіри, до прикладу, на границі дерміс-підшкірно-жирова клітковина температура досягає -28°C , а при $t = 1080$ с після повторного нагрівання температура на границі дерміс-підшкірно-жирова клітковина складає $+38^{\circ}\text{C}$.

Встановлено, що при збільшенні експозиції (кількості циклів) температурного впливу досягається глибше охолодження шарів шкіри та приблизно однаковий прогрів шкіри. Тобто, при тривалому температурному впливі у діапазоні температур $[-50 \div +50]^{\circ}\text{C}$ можна досягти деструкції та коагуляції приповерхневих новоутворень шкіри.

Отримані результати дають можливість прогнозувати глибину промерзання та прогрівання шарів шкіри людини при заданому циклічному температурному впливі для досягнення максимального ефекту при проведенні кріодеструкції або коагуляції. Розроблена методика комп'ютерного моделювання у динамічному режимі дозволяє визначати розподіли температури в різних шарах шкіри людини при наперед заданій довільній функції зміни температури робочого інструменту з часом $T_f(t)$.

Висновки

1. За допомогою комп'ютерного моделювання визначено розподіли температури у різних шарах шкіри в режимах охолодження та нагріву при зміні температури робочого інструменту за наперед заданим законом у діапазоні температур $[-50 \div +50]^{\circ}\text{C}$. Отримані результати дають можливість прогнозувати глибину промерзання та прогрівання біологічної тканини при заданому циклічному температурному впливі.
2. Розроблено методику комп'ютерного моделювання розподілу температур в шкірі людини у динамічному режимі, що дає можливість прогнозувати результати локального температурного впливу на шкіру та визначати в будь-який момент часу розподіли температури в різних шарах шкіри при наперед заданій довільній часовій функції зміни температури робочого інструменту $T_f(t)$.

Література

1. Анатичук Л.И. Термoeлементы и термoeлектрические устройства: / Л.И. Анатичук // Справочник. - К.: Наук. думка. - 1979. - 768 с.
2. Коленко Е.А. Термoeлектрические охлаждающие приборы. / Е.А. Коленко // Изд. 2 е. - Л.: Наука, 1967. - 283 с.
3. Анатичук Л.І., Денисенко О.І., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я., Перепічка М.П. Сучасні методи кріотерапії в дерматологічній практиці // Клінічна та експериментальна патологія. – Том XVI. – №1 (59). – 2017. – С. 150-156.
4. Денков В. На грани жизни / В. Денков // Пер. с болг. И. М. Сабуровой. - М.: «Знание», 1988. - 192 с.
5. Maruyama S., Nakagawa K., Takeda H. The flexible cryoprobe using Peltier effect for heat transfer

- control, Journal of Biomechanical science and engineering, 2008.- P. 138-150.
6. Коченов В.И. Криохирургическая профилактическая онкология. / В.И. Коченов // Н. Новгород. – 2000. – 56 с.
 7. Криологическая профилактическая онкология: краткое учебное и методическое пособие для врачей и студентов / В.И. Коченов; Изд. Организация Нижегородская областная онкологическая ассоциация инвалидов. – 2-е изд., перераб. – Н.Новгород : Б.и., 2003. – 92с.
 8. Коченов В.И. Адгезивный эффект в криохирургии./ В.И. Коченов // Реферат в МРЖ.-р. IV.- 1982.-№8.
 9. Москалик І.А., Маник О.М. Про використання термоелектричного охолодження у практиці кріодеструкції // Термоелектрика. – № 6. – 2013. – с.84-92.
 10. Анатичук Л.І., Денисенко О.І., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Про використання термоелектричного охолодження в дерматології та косметології // Термоелектрика. – № 3. – 2015. – С. 57-71.
 11. Москалик І.А. Про використання термоелектричних приладів у кріохірургії // Фізика і хімія твердого тіла. – №4.- 2015. – с. 742-746.
 12. Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Про перспективи використання термоелектрики для лікування захворювань шкіри холодом // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 5, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2016. – С. 67-72.
 13. Зинкин А.Н. Криовоздействие в оториноларингологии: [методические рекомендации] / А.Н. Зинкин, Н.Г. Зингилевская, Б.Б. Мусельян. – Краснодар, 1997. –16 с.
 14. Белоус А. М., Бондаренко В. А. Структурные изменения биологических мембран при охлаждении. - Киев: Наук. думка, 1982. - 254 с.
 15. Белоус А. М., Бондаренко В. А., Бабийчук Л. К. и др. Единый механизм повреждения клетки при термальном шоке, замораживании и постгипертоническом лизисе //Криобиология. -1985. - №2. - С. 25-32.
 16. Miller P., Metzner D. Cryosurgery for tumors of the head and nech - Trns. Am.Ophthalmol. Otolaringol. Soc., 1969, v. 73, г№2, p. 300-309.
 17. D'Hont G. La cryotherapie en ORL - Acta. Otorhinolaringol. Belg., 1974, t. 28, №2, p.274-278.
 18. Mazur P. Physical-chemical factors underlying cell injury in cryosurgical freezing. In:Cryosurgery ed. by R. W. Rand, A. P. Rinfret, H. Leden - Springfield, Illinois, U.S.A.1968 p. 32-51.
 19. Механизм разрушения биологических тканей при локальной кріодеструкції / В.В. Шафранов, Е.Н. Борхунова, М.А. Костылев [и др.] // Вестник российской академии естественных наук. – 2012. – № 1. С. 68 – 77.
 20. Кандель Э. И. Криохирургия. - Москва: Медицина, 1974. 301 с.
 21. Gill W., Fraser I. Alook at Cryosurgery. - Scot, Med, I., 1968, №13 p.268-273.
 22. Дершгольц В.Ф. Мир воды. Л., 1979. С. 254.
 23. Шафранов В.В., Короткий Н.Г. Возможности использования метода СВЧ-криодеструкции в дермокосметологии для лечения келоидных рубцов // Детская хирургия. 2000. № 1. С. 35–37.
 24. Van Venrjy G. Freeze-Etching: Freezing velocity and Cristal size at different size locations in Samples. // Cryobiology. 1975. Vol. 12. N 1. P. 46–61.
 25. H. Bause. Kryotherapie lokalisierter klassischer, Neues Verfahren mit Peltier-Elementen (–32°C) Erfahrungsbericht Hamangiome. Monatsschr Kinderheilkd – 2004. 152:16–22.
 26. Пономаренко Г. Н. Физиотерапия в косметологии. - СПб.: ВМедА, 2002. - 356 с.
 27. Задорожный Б.А. Криотерапия в дерматологии (Библиотека практического врача). – К.:

- Здоров'я. – 1985. – 72 с.
28. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Коцур М.П., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Оптимальне керування часовою залежністю температури охолодження в термоелектричних пристроях // Термоелектрика. – № 5. – 2016. – С.5-11.
 29. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Комп'ютерне моделювання локального теплового впливу на шкіру людини // Термоелектрика. – № 1. – 2017. – С.69-79.
 30. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Комп'ютерне моделювання та оптимізація динамічних режимів роботи термоелектричного приладу для лікування захворювань шкіри // Термоелектрика. – № 2. – 2017. – С.44-57.
 31. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я., Зварич О.В. Комп'ютерне моделювання та оптимізація динамічних режимів роботи термоелектричного приладу для рефлексотерапії // Термоелектрика. – № 3. – 2017. – С.68-78.
 32. L. Anatyshuk, L. Vikhor, M. Kotsur, R. Kobylianskyi, T. Kadaniuk. Optimal Control of Time Dependence of Temperature in Thermoelectric Devices for Medical Purposes // International Journal of Thermophysics". – International Journal of Thermophysics (2018) 39:108. <https://doi.org/10.1007/s10765-018-2430-z>.
 33. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Федорів Р.В. Методика врахування фазового переходу в біологічній тканині при комп'ютерному моделюванні процесу кріодеструкції // Термоелектрика. – № 1. – 2019. – С. 46-58.
 34. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Федорів Р.В. Комп'ютерне моделювання процесу кріодеструкції шкіри людини при термоелектричному охолодженні // Термоелектрика. – № 2. – 2019. – С. 21-35.
 35. Jiang S.C., Ma N., Li H.J., Zhang X.X. Effects of thermal properties and geometrical dimensions on skin burn injuries // Burns. – 28. – 2002. – p. 713-717.
 36. Cetingul M.P., Herman C. Identification of skin lesions from the transient thermal response using infrared imaging technique // IEEE. – 2008. – p. 1219-1222.
 37. Ciesielski M., Mochacki B., Szopa R. Numerical modeling of biological tissue heating. Admissible thermal dose // Scientific Research of the Institute of Mathematics and Computer Science, 1(10) 2011, p. 11-20.
 38. Florin Filipoiu, Andrei Ioan Bogdan, Iulia Maria Carstea. Computer-aided analysis of the heat transfer in skin tissue // Proceedings of the 3rd WSEAS Int. Conference on Finite Differences - Finite Elements - Finite Volumes - Boundary Elements. – 2010. – p. 53-59.
 39. Daniela Carstea, Ion Carstea, Iulia Maria Carstea. Interdisciplinarity in computer-aided analysis of thermal therapies // WSEAS Transactions on Systems and Control. – V.6. – №4. – 2011. – p. 115-124.
 40. Z.S. Deng, J. Liu. Numerical simulation of selective freezing of target biological tissues following injection of solutions with specific thermal properties // Cryobiology 50 (2005) 183-192.
 41. Han Liang Lim, Venmathi Gunasekaran. Mathematical Modeling of Heat Distribution during Cryosurgery // <https://isn.ucsd.edu/last/courses/beng221/problems/2011/project10.pdf>.
 42. Vishal N. Shah, Oleg I. Orlov, Cinthia Orlov, Manabu Takebe, Matthew Thomas, and Konstadinos Plestis. Combined cryo-maze procedure and mitral valve repair through a ministernotomy. Multimed Man Cardiothorac Surg. 2018. doi: 10.1510/mmcts.2018.022.
 43. Л. А. Бокерия, О. Л. Бокерия, С. Ю. Камбаров, О. Р. Мота, А. Ю. Заварина, П. П. Рубцов, А. С. Мордвинова, Криомодификация операции «лабиринт» в сочетании с протезированием митрального клапана, пластикой трикуспидального клапана и аортокоронарным

- шунтированием (клинический случай) // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН, 2009, №5. – С. 65–71.
44. Rykaczewski Konrad. Modeling thermal contact resistance at the finger-object interface // Temperature. Volume 6, 2019. - Issue 1. Pages 85-95.
45. Pennes H.H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting forearm *J. Appl. Physiol.* 1948. Vol. 1. no. 2. P. 93 – 122.
46. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. 2010. 804 p.

Надійшла до редакції 04.05.2020

Anatychuk L.I., acad. National Academy of Sciences of Ukraine^{1,2}
Kobylanskyi R.R., cand. phys.– math. sciences^{1,2},
Fedoriv R.V.^{1,2}

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

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

COMPUTER SIMULATION OF CYCLIC TEMPERATURE EFFECT ON THE HUMAN SKIN

This paper presents the results of computer simulation of cyclic temperature effect on the human skin in a dynamic mode. A three-dimensional computer model of biological tissue was built with regard to thermophysical processes, blood circulation, heat exchange metabolic and phase transition processes. As an example, the case is considered when on the skin surface there is a work tool whose temperature varies in the temperature range $[-50 \div +50]$ °C. Temperature distributions in different layers of the human skin in heating and cooling modes have been determined. The results obtained make it possible to predict the depth of biological tissue freezing and heating with a given temperature effect.

Keywords: temperature effect, human skin, dynamic mode, computer simulation.

References

1. Anatychuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva: spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices: reference book]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
2. Kolenko E.A. (1967). *Termoelektricheskiye okhlazhdaiushchiye pribory [Thermoelectric cooling devices]*. 2nd ed. Leningrad: Nauka [in Russian].
3. Anatychuk L.I., Denisenko O.I., Kobylanskyi R.R., Kadenuk T.Ya., Perepichka M.P.(2017). Suchasni metody krioterapii v dermatologichnii praktytsi [Modern cryotherapy methods in dermatological practice]. *Klinichna ta Eksperymentalna Patologiya*, XVI, 1(59), 150-156 [in Ukrainian].
4. Denkov V. (1988). On the edge of life. Moscow: Znaniie [Russian transl.]
5. Maruyama S., Nakagawa K., Takeda H. (2008). The flexible cryoprobe using Peltier effect for heat

- transfer control. *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 138-150.
6. Kochenov V.I. (2000). *Kriokhirurgicheskaiia profilakticheskaiia onkologiia [Cryosurgical preventive oncology]*. Niznii Novgorod [in Russian].
 7. Kochenov V.I. (2003). *Kriologicheskaiia profilakticheskaiia onkologiia: kratkoie uchebnoie i metodicheskoe posobiie dlia vrachei i studentov [Cryological preventive oncology: a short educational and methodological guide for doctors and students]*. Organization Nizhnii Novgorod Regional Oncological Association of Disabled People (Ed). 2nd revised ed. Nizhnii Novgorod [in Russian].
 8. Kochenov V.I. (1982). Adhesive effect in cryosurgery. *Abstract in the International Abstract Journal*, IV, 8.
 9. Moskalyk I.A., Manyk O.M. (2013). On the use of thermoelectric cooling in cryodestruction practice. *J.Thermoelectricity*, 6, 84-92.
 10. Anatychuk L.I., Denisenko O.I., Kobylianskyi R.R., Kadenyuk T.Ya. (2015). On the use of thermoelectric cooling in dermatology and cosmetology. *J.Thermoelectricity*, 3, 57-71.
 11. Moskalyk I.A. (2015). Pro vykorystannia termoelektrychnykh pryladiv u kriokhirurhii [On the use of thermoelectric devices in cryosurgery]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila - Physics and Chemistry of Solid State*, 4, 742-746.
 12. Kobylianskyi R.R., Kadenyuk T.Ya. (2016). Pro perspektyvy vykorystannia termoelektryky dlia likuvannia zakhvoriuvan shkiry kholodom [On the prospects of using thermoelectricity for treatment of skin diseases with cold]. *Naukovy visnyk Chernivetskogo universitetu: zbirnyk naukovykh prats. Fizyka. Elektronika - Scientific Bulletin of Chernivtsi University: Collection of Scientific Papers. Physics. Electronics*, 5, 1, 67 – 72 [in Ukrainian].
 13. Zinkin A.N., Zingilevskaia N.G., Muselian B.B. (1997). *Kriovozdeistvie v otorinolaringologii: metodicheskiiie rekomendatsii [Cryotherapy in otorhinolaryngology: guidelines]*. Krasnodar [in Russian].
 14. Belous A. M., Bondarenko V.A. (1982). *Strukturnyie izmeneniia biologicheskikh membran pri okhlazhdenii [Structural changes of biological membranes in cooling]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
 15. Belous A. M., Bondarenko V.A., Babiichuk L.K., et al. (1985). Edinyi mekhanizm povrezhdeniia kletki pri termalnom shoke, zamorazhivanii i postgipertonicheskom lizise [Unified mechanism of cell damage during thermal shock, freezing and posthypertensive lysis]. *Kriobiologiia – Cryobiology*, 2, 25-32 [in Russian].
 16. Miller P., Metzner D. (1969). Cryosurgery for tumors of the head and neck. *Trns. Am.Ophthalmol. Otolaringol. Soc.*, 73(2), 300-309.
 17. D'Hont G. (1974). La cryotherapie en ORL. *Acta. Otorhinolaringol. Belg.*, 28(2), 274-278.
 18. Mazur P. (1968). Physical-chemical factors underlying cell injury in cryosurgical freezing. In: *Cryosurgery* ed. by R. W. Rand, A. P. Rinfret, H. Leden. Springfield, Illinois, U.S.A.
 19. Shafranov V.V., Borkhunova E.N., Kostyliov M.A., et al. (2012). Mekhanizm razrusheniia biologicheskikh tkanei pri lokalnoi kriodestruktsii [Mechanism of destruction of biological tissues during local cryodestruction]. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, 1, 68 – 77 [in Russian].
 20. Kandel E.I. (1974). *Kriokhirurgiiia [Cryosurgery]*. Moscow: Meditsina [in Russian].
 21. Gill W., Fraser I. (1968). A look at cryosurgery. *Scot. Med*, I, 13, 268-273.
 22. Derpgolts V.F. (1979). *Mir vody [World of water]*. Leningrad [in Russian].
 23. Shafranov V.V., Korotkii N.G. (2000). Vozmozhnosti ispolzovaniia metoda CVCh-destruktsii v dermokosmetologii dlia lecheniia keloidnykh rubtsov [Possibilities of using the microwave

- cryodestruction method in dermocosmetology for the treatment of keloid scars]. *Detskaia khirurgiia - Pediatric Surgery*, 1, 35–37 [in Russian].
24. Van Venrjy G. (1975). Freeze-etching: freezing velocity and crystal size at different size locations in samples. *Cryobiology*, 12(1), 46–61.
 25. Bause H. (2004). Kryotherapie lokalisierter klassischer, Neues Verfahren mit Peltier-Elementen (–32°C) Erfahrungsbericht Hamangiome. *Monatsschr Kinderheilkd.* 152:16–22.
 26. Ponomarenko G.N. (2002). *Fizioterapiia v kosmetologii [Physiotherapy in cosmetology]*. St.Petersburg: Voienno-Meditsinskaia Akademia [in Russian].
 27. Zadorozhnyi B.A. (1985). *Krioterapiia v dermatologii (Biblioteka prakticheskogo vracha). [Cryotherapy in dermatology (Library of practicing physician)]*. Kyiv: Zdorovie [in Russian].
 28. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Kotsur M.P., Kobylanskyi R.R., Kadenyuk T.Ya. (2016). Optimal control of time dependence of cooling temperature in thermoelectric devices. *J.Thermoelectricity*, 5, 5-11.
 29. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Kadenyuk T.Ya. (2017). Computer simulation of local thermal effect on the human skin. *J.Thermoelectricity*, 1, 69-79.
 30. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Kobylanskyi R.R., Kadenyuk T.Ya. (2017). Computer simulation and optimization of the dynamic operating modes of thermoelectric device for treatment of skin diseases. *J.Thermoelectricity*, 2, 44-57.
 31. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Kobylanskyi R.R., Kadenyuk T.Ya., Zvarich O.V. (2017). Computer simulation and optimization of the dynamic operating modes of thermoelectric reflexotherapy device. *J.Thermoelectricity*, 3, 68-78.
 32. Anatyshuk L., Vikhor L., Kotsur M., Kobylanskyi R., Kadenyuk T. (2018). Optimal control of time dependence of temperature in thermoelectric devices for medical purposes. *International Journal of Thermophysics* 39:108. <https://doi.org/10.1007/s10765-018-2430-z>.
 33. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Fedoriv R.V. (2019). Method for taking into account the phase transition in biological tissue during computer-aided simulation of cryodestruction process. *J. Thermoelectricity*, 1, 46-58.
 34. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Fedoriv R.V. (2019). Computer simulation of human skin cryodestruction process during thermoelectric cooling. *J.Thermoelectricity*, 2, 21-35.
 35. Jiang S.C., Ma N., Li H.J., Zhang X.X. (2002). Effects of thermal properties and geometrical dimensions on skin burn injuries. *Burns*, 28, 713-717.
 36. Cetingul M.P., Herman C. (2008). Identification of skin lesions from the transient thermal response using infrared imaging technique. *IEEE*, 1219-1222.
 37. Ciesielski M., Mochnecki B., Szopa R. (2011). Numerical modeling of biological tissue heating. Admissible thermal dose. *Scientific Research of the Institute of Mathematics and Computer Science*, 1(10), 11-20.
 38. Filipoiu Florin, Bogdan Andrei Ioan, Carstea Iulia Maria (2010). Computer-aided analysis of the heat transfer in skin tissue. *Proceedings of the 3-rd WSEAS Int. Conference on Finite Differences - Finite Elements - Finite Volumes - Boundary Elements*, 2010, 53-59.
 39. Carstea Daniela, Carstea Ion, Carstea Iulia Maria (2011). Interdisciplinarity in computer-aided analysis of thermal therapies. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 6(4), 115-124.
 40. Deng Z.S., Liu J. (2005). Numerical simulation of selective freezing of target biological tissues following injection of solutions with specific thermal properties. *Cryobiology*, 50, 183-192.
 41. Lim Han Liang, Gunasekaran Venmathi (2011). *Mathematical modeling of heat distribution during cryosurgery*. <https://isn.ucsd.edu/last/courses/beng221/problems/2011/project10.pdf>.

43. Shah Vishal N., Orlov Oleg I., Orlov Cinthia, Takebe Manabu, Thomas Matthew, and Plestis Konstadinos (2018). Combined cryo-maze procedure and mitral valve repair through a ministernotomy. *Multimed Man Cardiothorac Surg*. 2018. doi: 10.1510/mmcts.2018.022.
44. Bokeriia L.A., Bokeriia O.L., Kambarov S.Yu., Mota O. R., Zavarina A.Yu., Rubtsov P.P., Mordvinova A.S. (2009). Kriomodifikatsiia operatsii "labirint" v sochetanii s protezirovaniem mitralnogo klapana, plastikoi trikuspidalnogo klapana i aortokoronarnym shuntirovaniem (klinivcheskii sluchai) [Cryomodification of the "labyrinth" operation in combination with mitral valve replacement, tricuspid valve plasty and coronary artery shunting (clinical case)]. *Bulletin of A.N.Bakulev Scientific Centre of Crdiovascular Surgery RAMS*, 5, 65–71.
45. Rykaczewski Konrad (2019). Modeling thermal contact resistance at the finger-object interface. *Temperature*, 6 (1), 85-95.
46. Pennes H.H. (1948)ю Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting forearm *J. Appl. Physiol.* , 1(2), 93 – 122.
47. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010).

Submitted 04.05.2020

УДК 537



Філін С.О.

Філін С.О. доктор техн. наук

Західнопоморський технологічний університет у Щецині
алея Піастів 17, Щецин, 70-310, Польща;
e-mail: Sergiy.Filin@zut.edu.pl

РОЗРАХУНОК ШВИДКОДІЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА НАПОЇВ З «МОКРИМИ» КОНТАКТОМ

У статті запропоновано інженерну методику розрахунку швидкості охолодження напою в термоелектричному охолоджувачі з мокрим і сухим контактом. Розрахунковим шляхом був підтверджений раніше доведений експериментально висновок про те, що заповнення щілини між пляшкою з напоєм і ємністю охолоджувача дозволяє істотно підвищити швидкодію охолоджувача. Представлено результати порівняльних розрахунків на прикладі автомобільного охолоджувача напоїв Car mini-cooler FM 201.001. Запропоновано шляхи удосконалення конструкції охолоджувача з метою підвищення його швидкодії.

Бібл. 14, Рис. 6, Табл. 5.

Ключові слова: охолоджувач напоїв, швидкість охолодження, умови теплообміну, теплові опори.

Вступ

Дана стаття є другою частиною циклу з трьох праць, присвячених розробці та дослідженню термоелектричних охолоджувачів напоїв з мокрим контактом. У попередній статті [1] було проаналізовано ринок сучасних побутових і автомобільних термоелектричних охолоджувачів напоїв з точки зору їх швидкості охолодження. Показники швидкодії цих пристроїв не задовольняють запити споживачів. Шляхом експериментальних досліджень було доведено ефективність застосування т.зв. «мокрого» контакту для збільшення швидкодії охолоджувачів. Мокрий контакт – це заповнення повітряного зазору між банкою або пляшкою з напоєм і ємністю охолоджувача водою або іншою рідиною. Наведений нижче теоретичний аналіз дозволяє визначити основні фактори, що впливають на згадану ефективність.

Розрахункова модель

Вихідні дані та припущення

1. Як і в експерименті [1], в якості охолоджуваного напою приймаємо воду, як рідину з найбільшою теплоємністю. Такий підхід дозволяє виключити спекуляції, пов'язані з неточністю визначення теплофізичних властивостей конкретних напоїв.
2. Аналогічно, в якості тари для напою приймаємо алюмінієву банку, ємністю 0.33 літри. Її параметри стандартизовані і уніфіковані в більшості країн світу [4].
3. Параметри охолоджувача, в тому числі термоелектричного модуля, прив'язуємо до дійсних технічних характеристик охолоджувачів типу Car mini-cooler FM 201.001, використаних в експерименті (рис. 1).



Рис. 1. Автомобільний охолоджувач напоїв Car mini-cooler FM 201.001 (зліва), справа окремо його ємність з встановленим на ній термоелектричним модулем

4. Дно ємності в охолоджувачі Car mini-cooler FM 201.001 виконанню як окремий елемент з неметалевого матеріалу, а дно банки увігнуте. Має місце лінійний безпосередній контакт банки і дна по колу опуклою частини дна. Тому при розрахунку охолоджувача з сухим контактом приймаємо, що поверхня дна не бере участі в теплообміні між ємністю і банкою з напоєм.
5. Тепловим опором банки зважаючи на його малість нехтуємо. Однак в разі пластикової пляшки ця складова загального теплового опору повинна враховуватися.
6. Приймаємо, що простір між ємністю і корпусом охолоджувача заповнений теплоізоляцією з пінополіуретану (рис. 2).

Ошибка! Ошибка внедренного объекта.

Рис. 2. Розрахункова схема охолоджувача напоїв.

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Величина	Джерело	Примітка
Ємність охолоджувача			
Матеріал		Дані вироб-ника	Алюмінієвий сплав АМЦ
Коефіцієнт теплопровідності, λ_p	188 Вт/м К	[2]	
Питома масова теплоємність, c_p	985 Дж/(кг·К)	[2]	
Маса (без донної частини), m_p	113.850 г		Виміряна
Висота, h_p	69 мм		Виміряна
Внутрішній діаметр, d_p	67 мм		Виміряна

Товщина, δ_p	2 мм		Виміряна
Вода в ємності			
Коефіцієнт теплопровідності, λ_w	0.55 Вт/(м·К)	[3]	При температурі 10 °С
Питома масова теплоємність, C_w	4200 Дж/(кг·К)	[3]	При температурі 10 °С
Загальна маса, m_w	15.0 г		Виміряна
в т.ч. маса води в циліндричній зазорі, m_{w1}	7.1 г		Розраховано
Висота, h_w	68 мм		На 1 мм менше, ніж h_p
Товщина шару, δ_w	0.5 мм		$(D_p - D_c)/2$
Банка для напою			
матеріал		[4]	Алюмінієвий сплав АМг2
Коефіцієнт теплопровідності, λ_c	159 Вт/(м·К)	[5]	
Питома масова теплоємність, C_c	963 Дж/(кг·К)	[5]	
Маса, m_c	13.280 г		Виміряна
Зовнішній діаметр, D_c	66 мм	[4]	
Висота, h_c	115.2 мм	[4]	
Товщина, δ_c	0.11 ... 0.30 мм	[4]	0.11 - в циліндричній частині 0.30 - в нижній частині
Напій (вода)			
Коефіцієнт теплопровідності, λ_d	0.574 Вт / м К	[3]	При температурі 15 °С ¹
Питома масова теплоємність, c_d	4190 Дж/(кг·К)	[3]	При температурі 15 °С
Маса, m_d	332.0 г		Виміряна
Ізоляція			
матеріал			Пінополіуретан
Коефіцієнт теплопровідності, λ_{in}	0.029 Вт/(м·К)	[6]	
Питома теплоємність, c_{in}	1.47	[6]	
Щільність, σ_{in}	40 кг/м ³	[6], [7]	
Товщина, δ_{in}	6.5 мм		Виміряна

Розрахунок теоретично мінімального часу охолодження

Мінімальний час τ_{\min} охолодження напою в банку до температури t_f (при ідеальних умовах теплообміну на межах середовищ) можна знайти з теплового балансу холодної сторони охолоджувача:

$$(\bar{Q}_0 - \bar{Q}_2 - \bar{Q}_3 - \bar{Q}_{in}) \cdot \tau_{\min} = Q_d + Q_c + Q_w + Q_p + Q_{in}, \quad (1)$$

$$(\bar{Q}_0 - \bar{Q}_2 - \bar{Q}_3 - \bar{Q}_{in}) \cdot \tau_{\min} = m_d c_d \cdot (t_a - t_f) + (m_w c_w + m_p c_p) \cdot (t_a - t_p) + (m_{in} c_{in}) \cdot \frac{t_a - t_p}{2}, \quad (2)$$

¹

Прийнята як середня температура напою в процесі його охолодження.

де: \bar{Q}_0 – середня за час охолодження холодопродуктивність термоелектричного модуля; \bar{Q}_2 – середня потужність теплопритоку від навколишнього середовища через дно банки, \bar{Q}_3 – середня потужність теплопритоку від навколишнього середовища до верхньої, що не зануреної в ємність частини банки, \bar{Q}_{in} – середня потужність теплопритоку від навколишнього середовища через ізоляцію, $Q_d, Q_c, Q_w, Q_p, Q_{in}$ – кількість теплоти відведений від напою (drink), банки (can), води в зазорі (water), ємності (pol. - pojemnik) та ізоляції (insulation) відповідно, m – маса, c – теплоємність, t_a – температура повітря в приміщенні, вона ж початкова температура всіх елементів, t_f – (finish) кінцева температура напою, t_p – середня температура ємності охолоджувача в кінці процесу охолодження.

Єдиною невідомою величиною в рівнянні (2) є температура t_p . Її можна розрахувати з теплового балансу зазору або скористатися експериментальними даними. Закладаючи в розрахунок величини $t_a = 25^\circ\text{C}$, $t_f = 10^\circ\text{C}$, $t_p = 8.2^\circ\text{C}$ і підставляючи дані з таблиці 1, отримуємо:

Таблиця 2

Проміжні результати розрахунку складових теплового балансу

Об'єкт	Позначення	m, c_i [Дж / К]	Q_i [Дж]	Процентне співвідношення
Напій	m_d, c_d, Q_d	1382.7	20740.5	87.44%
Банка	m_c, c_c, Q_c	11.95	200.76	0.85%
Вода в зазорі	m_w, c_w, Q_w	62.85	1055.88	4.45%
Ємність	m_p, c_p, Q_p	102.46	1721.3	7.26%
Ізоляція	m_{in}, c_{in}, Q_{in}	0.013	0.1065	0.0005%
Сума	Σ	1560	23718.6	100%

З представлених даних випливає, що, з точки зору масової теплоємності, наявність води в зазорі збільшує теплове навантаження на модуль менш, ніж на 5%. Вплив банки (0.85%) знаходиться в межах похибки експерименту, а отже, може не враховуватися в інженерних розрахунках, подібно, як і вплив ізоляції, який взагалі неістотний. Нижче проаналізовано роль теплових опорів тих же елементів. Аналогічний висновок по відношенню до ізоляції можна зробити при аналізі структури теплопритоків. У роботах [9], [10] було показано, що ізолювання льодоформи термоелектричних льодогенераторів кубикового льоду не дає збільшення продуктивності льодогенератора, тому що основну частку теплового навантаження становить процес фазового переходу вода-лід. Незважаючи на те, що в нашому прикладі не йдеться про заморожування напою, внесок теплопритоків з навколишнього середовища також не є суттєвим. І в разі льодогенераторів і в охолоджувачах, тобто у виробках, де динамічні характеристики є визначальними, тепловий опір шарів матеріалів між об'єктом охолодження і джерелом холоду

справляє більший вплив, ніж масова теплоємність. Дані експериментів і подальші розрахунки підтверджують цю тезу.

Алгоритм розрахунку середньої холодопродуктивності модуля \bar{Q}_0

Щоб можна було скористатися даними виробника модуля, наведеними в таблиці 3 і на рис. 3, слід:

- 1) інтерполювати величини $Q_{0\max}$ та ΔT_{\max} між двома температурами гарячої сторони охолоджувача (виробник дає дані для температур 27 і 50 °С) для температури t_h гарячого радіатора в усталеному режимі, яка була виміряна під час експерименту, тобто для $t_h = 32^\circ\text{C}$;
- 2) визначити величину відносного струму I/I_{\max} . У нашому випадку це $2.15 / 3.4 = 0.63$;
- 3) побудувати залежність $Q_{0\max}(\Delta T_{\max})$ для цього співвідношення і вищезгаданої температури t_h ;
- 4) використовуючи прийняті вище закладення, обчислити $\Delta T = t_h - t_p$ і графічно визначити \bar{Q}_0 як показано на рис. 4.

Іншим можливим варіантом є розрахунок \bar{Q}_0 за формулою запропонованою в роботі [8].

Таблиця 3

Технічні параметри модуля MT-1-1.45-143S

Параметри	Величини	MT-1-1.45-143S
Струм, max	А	3.4
Напруга, max	В	16.6
Потужність охолодження, max (в $T_h = 27^\circ\text{C}$)	Вт	33
Темп. Різниця, max (в $T_h = 27^\circ\text{C}$ у вакуумі)	К	70
Опір (в $T_h=27^\circ\text{C amb}$)	Омм	$4.56 \pm 10\%$
Ширина	мм	$40 + 0.5/-0.1$
Довжина	мм	$40 + 0.5/-0.1$
Товщина	мм	3.8
Толерантність до товщини	мм	± 0.3
Паралельна різниця	мм	0.05
Довжина дроту	мм	$120 + 10$
Дротяна секція	мм ²	0.35
Робоча температура, max	°С	90

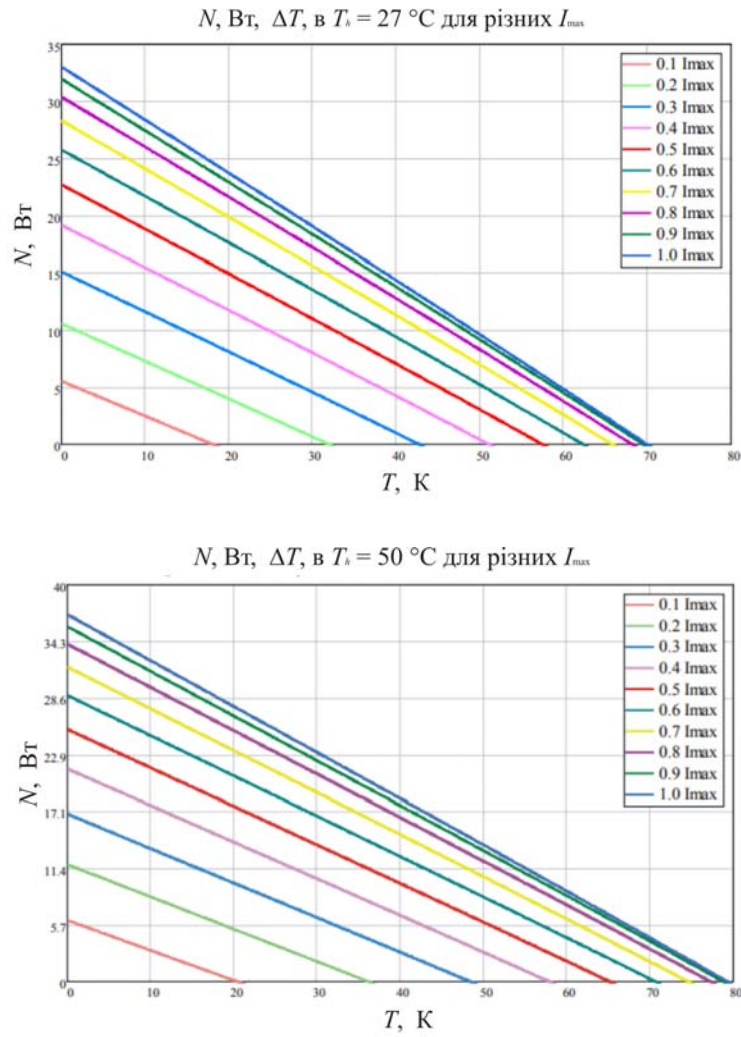


Рис. 3. Навантажувальні характеристики модуля МТ-1-1.45-143S.

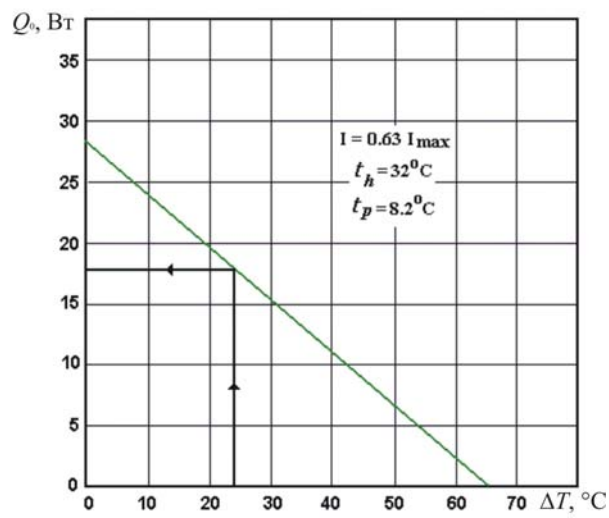


Рис.4. Графічний спосіб визначення холодопродуктивності модуля МТ-1-1.45-143S в сталому режимі роботи на базі даних виробника (рис. 3).

Ошибка! Ошибка внедренного объекта.

Рис.5. Типова динаміка зміни температур по холодній та гарячій стороні модуля термоелектричного охолоджувача при температурі навколишнього середовища $t_a = 25^\circ\text{C}$: 1 - температура гарячого радіатора t_h , 2 - температура ємності при мокрому контакті t_{pw} , 3 - температура ємності при сухому контакті t_{pd} , 4 - середня температура напою t_d .

Через змінність температур по обидва боки термоелектричного модуля величина \bar{Q}_0 також не є сталою. Її відносна стабілізація настає приблизно через 10 хвилин після включення охолоджувача (рис. 5). Тому, щоб збільшити точність розрахунку, можна окремо визначити величини Q_{01}^2 і Q_{02} для двох відрізків часу τ_1 і τ_2 і потім скористатися формулою (3)

$$\bar{Q}_0 = \frac{Q_{01} \cdot \tau_{\min} + Q_{02} \cdot (\tau_{\min} - \tau_1)}{\tau_{\min}} \quad (3)$$

де $\tau_1 = 10$ хвилин.

Підставляючи вираз (3) в вираз (2) знаходимо τ_{\min} .

$$\tau_{\min} = \left(\frac{\sum Q_i - 10 \cdot 60 \cdot Q_{01}}{Q_{02}} \right) + 10 \cdot 60 = 1244.9 \text{ s} = 20\text{m}48\text{s}, \quad (4)$$

де $Q_{01} = 20.4$ Вт, $Q_{02} = 17.8$ Вт.

Розрахунок величин \bar{Q}_2 , \bar{Q}_3 , \bar{Q}_{in} по відомим залежностям для теплопередачі через багат шарову стінку і для природної конвекції в повітрі (з урахуванням даних представлених в таблиці 4): дав наступні результати: $\bar{Q}_2 = 0.027$ Вт, $\bar{Q}_3 = 0.063$ Вт, $\bar{Q}_{in} = 0.019$ Вт. Сума цих трьох теплопритоків (0.109 Вт) становить всього 0.6 % середньої холодопродуктивності модуля, що дає можливість не враховувати їх в інженерних розрахунках.

Фактичний час охолодження напою від 25°C до 10°C в 2.5 рази більше (табл. 5), що обумовлено тепловими опорами шарів δ_c , δ_w і δ_p (рис.2).

Розрахунок часу охолодження з урахуванням теплових опорів шарів

Щоб врахувати вплив теплового опору шарів середовищ, що знаходяться в зазорі між напоєм і джерелом холоду (модулем), потрібно скористатися тепловим балансом об'єкта охолодження в регулярному тепловому режимі [3, 11]:

$$\sum (m_i c_i) \cdot d(\Delta t_1) = k_{\Sigma} \cdot F \cdot \Delta t_f \cdot d(\tau) \quad (5)$$

Вирішуючи рівність (5) щодо τ , отримуємо:

$$\tau = \frac{\sum m_i c_i}{k_{\Sigma} F} \ln \frac{t_a - t_p}{t_f - t_p}, \quad (6)$$

де:

$$k_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_p^*}{\lambda_p}} \quad (7)$$

В залежності (6) враховуємо окремо теплообмін через дно ємності, виконане з жорсткого пластика ($\lambda_b = 0.2$ Вт/(м·К)). В залежності (7), при розрахунку теплового опору ємності δ_p^*/λ_p , використовуємо наведену товщину δ_p^* , розраховану за формулою (8):

$$\delta_p^* = \frac{F_1 \delta_1 + (F - F_1)}{F} \quad (8)$$

де: $F_1 = h_p a_m$, $F = \pi d_p h_p$, $\delta_1 = \delta_p + 5$ mm (див. рис. 1), $\delta_2 = 1/2 (\pi d_p - a_m/2)$.

Підставляючи дані з таблиці 1, і, приймаючи коефіцієнт тепловіддачі від води до стінки банки $\alpha_d = 140$ Вт/м² [12, 13], отримуємо $\delta_p^* = 36$ mm, $k_{\Sigma} = 122.1$ Вт/м²К.

Обговорення результатів і висновки

З табл. 4 видно, як радикально змінюється роль опору в зазорі ємність-банк при переході від сухого контакту до мокрого: з 76.5 % до 12.1 % загального опору. На сірому тлі в таблиці показані опори, які не враховуються в розрахунку.

Таблиця 4

Проміжні результати розрахунку термічного опору шарів

об'єкт	позначення	Величина, К / Вт	Процентне співвідношення, %			
			сухий контакт	мокрый контакт	сухий контакт	мокрый контакт
Напій – банка		$1 / \alpha_d$	0.0066	0.0066	23.3	87.9
Банка		δ_c / λ_c	0.0000018	0.0000018		

Продовження таблиці 4

Зазор повітря		$\delta_{air} / \lambda_{air}$	0.0217		76.7	
- вода		δ_w / λ_w		0.00091		12.1
Ємність		δ_p / λ_p	0.0000191	0.0000191		
Ізоляція		$\delta_{in} / \lambda_{in}$	0.224	0.224		
Банка - повітря		$1 / \alpha_c$	0.25	0.25		
Напій - дно ємності:						
– повітря		$1 / \alpha_d + \delta_{air} / \lambda_{air} +$	0.18			
– вода		δ_b / λ_b		0.019		
		$1 / \alpha_d + \delta_{w1} / \lambda_w +$				
		δ_b / λ_b				
		kΣ	0.0283	0.0075	100%	100%

Розрахунок часу охолодження напою (води) від температури 25°C до 10°C за формулою (6) з урахуванням залежностей (7) і (8) дав наступні результати (табл. 5):

Таблиця 5

Результати розрахунку часу охолодження напою в охолоджувачах з сухим і мокрим контактом

Тип охолоджувача	Теоретично мінімальний час, τ_{\min} , хвилини	Фактичний час, τ , хвилини	
		розрахунок	експеримент [1]
сухий контакт	19.82	68.57	70
мокрый контакт	20.82	30.43	50

Аналіз даних, представлених в таблиці 5, підтверджує раніше доведену експериментально [1] ефективність використання теплового контакту як засобу підвищення швидкодії термоелектричних охолоджувачів. Отримано гарний збіг розрахункового і отриманого на досліді часу охолодження для охолоджувача з сухим контактом. У той же час для охолоджувача з мокрим контактом розрахунковий час істотно менший за експериментальний. Це, з одного боку вказує на недосконалість методики розрахунку, головним чином, в частині оцінки впливу теплообміну через дно банки. Можна припустити, що наявність води під банкою принципово змінює роль цієї донної поверхні з позитивної на негативну, тобто більшою мірою збільшує теплоприток від навколишнього середовища, ніж збільшує поверхню теплообміну в напрямку напій-модуль.³ З іншого боку, це свідчить про наявність резерву ефективності використання ідеї мокрого контакту. Охолоджувач *Car mini-cooler FM 201.001* на початку не був розрахований і не був ідеально пристосований для використання води в зазорі ємність-банка.

Щоб максимально використовувати перевагу мокрого контакту, було запропоновано нове технічне рішення (рис.6) [14] охолоджувача. Він має ряд істотних відмінностей від описаного вище, а саме:

- висота ємності збільшена до висоти пляшки (банки);
- модуль розташований в донній частині ємності, що повноцінно включає донну поверхню в процес передачі тепла;
- збільшена товщина стінки ємності, що в свою чергу, збільшує ефективність стінки як ребра;
- запропоновано оригінальне рішення ущільнення зазору ємність-банку, що дозволяє уникнути витік води з зазору в разі перекидання охолоджувача.

Результати розрахунку і результати випробувань нового охолоджувача буде представлено в наступній статті.

Ошибка! Ошибка внедренного объекта.

Рис.6. Побутовий термоелектричний охолоджувач напоїв TSSN-0,5 [14]: 1 - циліндрична ємність, 2 - теплоізоляція, 3 - термоелектричний модуль, 4 - радіатор, 5 - вентилятор, 6 - гвинти кріплення вентилятора, 7 - гвинти стяжки агрегату, 8 - зовнішній корпус, 9 - вентиляційна решітка, 10 - ніжки, 11 - пляшка з напоєм, 12 - вода в зазорі, 13 - еластична ущільнююча манжета, 14 - накладка, 15 - гвинти кріплення накладки.

Література

1. Filin SO The influence of thermal contact between cooling surface and object on quick-speed thermoelectric coolers for beverages. Journal of Thermoelectricity. 2018, n.1, P. 66-78.
2. Теплофізичні властивості, склад і теплопровідність алюмінієвих сплавів. www.thermalinfo.ru.
3. Бобков В.А. Виробництво і застосування льоду. Харчова промисловість, Москва, 1977, 232 р.
4. ГОСТ 33748-2016. Банки алюмінієві глибокої витяжки з кришками, що легко відкриваються. Загальні технічні умови.
5. ГОСТ 4784-97. Алюміній і сплави алюмінієві деформівні. Марки.
6. СНіП 23-02. Розрахункові теплотехнічні показники полімерних будівельних матеріалів і виробів, теплоємність, теплопровідність і теплосасвоєння в залежності від щільності і вологості, паропроникність. Пінополістіроли, пінополіуретани, пінопласти.
7. <https://ppu-system.com/category-production/zhestkie/zalivka/sendvich-paneli/>
8. Filin S. Termoelektryczne urządzenia chłodnicze. IPPU Masta, Gdańsk, 2002 216 p.
9. Philin S.O. Thermoelectric ice-makers: Calculation, design, manufacturing experience. Journal of Thermoelectricity, n.2, 1997, P. 82-94.
10. Chmielowski M., Filin S., Zakrzewski B. Theory and technology of production of food complex-shaped ice with the application of two-sided freezing. Chemical and Process Engineering. Vol. 31, N. 3, 2010 P. 461-476.
11. Чижов Г.Б. Теплофізичні процеси в холодильній технології харчових продуктів. Харчова промисловість, Москва, 1979, 272 р.
12. Шаталіна І.М. : Теплообмін в процесах наморозування і танення льоду. - Л. : Вища школа, 1990, 120 р.
13. www.el-g.com.ua/article/kak-rasschitat-moshchnost-sistemy-obogreva-rezervuara.html
14. Filin S., Anatyshuk LI Termoelektryczne schładzaczce napojów. Zgłoszenie patentowe PL 426737 z dnia 22.08.2018.

Подяки

Автор висловлює щире і глибоке вдячність керівництву S & PF Modul за люб'язно надану інформацію про технічні характеристики своїх виробів, закладену в основу розрахунків, і за багаторічне науково-технічне співробітництво.

Надійшла до редакції 13.05.2020

Філін С.О. доктор техн. наук

Западнопоморський технологічний університет в Щецине
аллея Пиастов 17, Щецин, 70-310, Польща

e-mail: Sergiy.Filin@zut.edu.pl

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

В статье проанализированы технические характеристики и в первую очередь энергетические современных термоэлектрических холодильников (ТЭХ), а также способы повышения их энергетической эффективности. Представлены результаты сравнительных испытаний новых, разработанных автором моделей ТЭХ и показаны их преимущества над мировыми аналогами. Библ. 7, Рис. 7.

Ключевые слова: термоэлектрический холодильник, транспортный холодильник, энергосбережение, регулирование температуры.

S.O. Filin *doctor of tech. science*

West Pomeranian University of Technology, Szczecin
17, al. Piastow, Szczecin, 70-310, Poland
e-mail: Sergiy.Filin@zut.edu.pl

COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY CHARACTERISTICS OF MODERN THERMOELECTRIC REFRIGERATORS

This article analyzes technical, primarily energy characteristics of modern thermoelectric refrigerators (TER), as well as the ways to increase their energy efficiency. The results of comparative tests of new TER models developed by the author are presented and their advantages over the world analogues are shown. Bibl. 7, Fig. 7.

Key words: thermoelectric refrigerator, transport refrigerator, energy saving, temperature control.

References

1. Vainer A.L., Moiseev V.F. (2002). Power consumption minimizing of the thermoelectric cooler at position control. *J. Thermoelectricity*, 2, 68-71.
2. Patent RP № 224189. S.Filin, B. Jasińska, B. Zakrzewski, M. Chmielowski. Sposób redukcji zużycia energii przez chłodziarkę termoelektryczną i chłodziarka termoelektryczna. Publ. 06.12.2016.
3. Jasińska B., Filin S. (2015). Economical transport thermoelectric refrigerators with two-level temperature control: the experience of creation and test results. *J. Thermoelectricity*, 3, 38-44.
4. B. Zakrzewski (Ed.) (2015). Chłodnictwo i klimatyzacja. Podręcznik. Odessa: Astroprint.
5. Filin S., Jasińska B. (2013). Efektywność energetyczna transportowych chłodziarek termoelektrycznych. Energetycznie efektywne rozwiązania urządzeń chłodniczych, klimatyzacyjnych i pomp ciepła. *XLV Dni Chłodnictwa*. (Poznań, 13-14 11.2013). (s. 63-74).

6. Filin S.O., A.Owsicki, B.Zakrzewski. (2011). Experimental investigation of stationary thermoelectric coolers. Odessa: Astroprint [in Russian].
7. Filin S., Zakrzewski B. (2010). Zastosowanie dwupołożeniowego regulatora temperatury typu manometrycznego w chłodziarkach termoelektrycznych. *Chłodnictwo*, 1-2, 2010, 30-34.

Submitted 13.05.2020

УДК 538.935

Грабов В.М., докт. фіз.-мат. наук, професор
Демидов С.В., канд. фіз.-мат. наук
Комаров В.А., канд. фіз.-мат. наук
Суслов А.В., Герега В.А., Єфімов Д.Д.

Російський державний педагогічний університет ім. А. І. Герцена,
наб. р. Мойки, Санкт-Петербург, 191186, Росія,

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ПЛІВОК ВІСМУТУ І ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ ВІСМУТ-СУРМА

Методом, що виключає виникнення зовнішніх деформаційних впливів на систему плівка-підкладка, були досліджені температурні залежності питомого опору і термоЕРС, розрахований фактор термоелектричної потужності в інтервалі температур 77-300 К для плівок твердого розчину вісмут-сурма на підкладках з різним коефіцієнтом температурного розширення. Встановлено, що для отримання максимальної термоЕРС критично важливим є співвідношення розміру кристалітів і товщини плівки, що обумовлено різним обмеженням рухливостей електронів і дірок поверхнею і межами кристалітів. Максимальне значення термоЕРС і фактора потужності відповідає товстим блоковим плівкам $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ на слюді. Робота виконана в рамках державного завдання за фінансової підтримки Міносвіти Росії (проект № FSZN-2020-0026). Бібл., рис., табл.

Ключові слова: вісмут, вісмут-сурма, термо, розмірний ефект, фактор потужності

Вступ

Твердий розчин вісмут-сурма відомий як найбільш ефективний низькотемпературний (температури нижче 200 К) термоелектричний матеріал. При цьому праці останніх років показують можливість використання квантових і класичних розмірних ефектів в електронних явищах, а також внутрішніх деформацій для збільшення термоелектричної ефективності матеріалів [1 – 5].

Термоелектрична ефективність (Z) в низькорозмірних структурах і наноструктурах в порівнянні з однорідними масивними матеріалами може збільшуватися як за рахунок збільшення фактора потужності (P) внаслідок особливостей щільності станів в околі дна нижньої підзони розмірного квантування [**Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.**], так і за рахунок зменшення теплопровідності внаслідок розсіювання фононів на межах поділу [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Ще одним механізмом зміни термоелектричної потужності може служити зміна співвідношення внеску електронів і дірок в термоЕРС внаслідок різного обмеження їх рухливостей поверхнею і межами кристалітів в тонкій плівці [8, 9].

Додаткові можливості вирішення проблеми збільшення термоелектричної ефективності відкриває стрейнотроніка [10]. Стрейнотронікою (від англ. Strain - натяг) називають новий науковий напрям фізики конденсованого стану, що використовує фізичні ефекти в твердих тілах, обумовлені деформаціями, що виникають в мікро- і нанощарах і гетероструктурах під дією зовнішніх керуючих полів, що призводять до змін зонної структури, електричних, магнітних, оптичних та інших властивостей матеріалів [11]. Можливості стрейнотроніки стають очевидними, якщо звернути увагу,

що деякі теоретичні розрахунки і окремі експериментальні результати показують, що використання високого тиску може істотно збільшити ZT деяких матеріалів [12]. Однак даний підхід не набув поширення в зв'язку з технологічною складністю створення великих тисків в готових пристроях. Аналогом високого тиску може виступати як раз деформація, яка в разі тонкоплівкових матеріалів може бути легко створена кількома способами, зокрема, використанням підкладок з різними параметрами ґратки та температурними коефіцієнтами розширення, напилення плівок на вигнуті підкладки або їх контрольований вигин безпосередньо в процесі експлуатації і т.п. У низькорозмірних структурах, які знаходяться на підкладках, можливе створення рекордних пружних деформацій. Наприклад, оскловані нитки вісмуту субмікронних розмірів витримують відносні видовження в 2-3 % [13]. Це еквівалентно таким значенням пружних деформацій в масивних кристалах, які відповідають механічним напругам до 1 ГПа, що приблизно відповідає значенням, що застосовуються при дослідженні масивних кристалів такого типу. В даний час активні дослідження в області стрейнтроники лише розпочинаються.

В рамках даної роботи експериментально досліджуються можливості збільшення термоелектричної ефективності тонких плівок вісмуту і твердого розчину вісмут-сурма з допомогою вищевказаних підходів.

Методика експерименту

Досліджено плівки вісмуту товщиною від 10 нм до 1 мкм і плівки вісмут-сурма з концентрацією сурми від 3 до 15 ат. % *Sb*. В якості підкладок використовувалися пластини монокристалічної слюди (мусковіт) та поліамідна плівка. Коефіцієнт теплового лінійного розширення (КТР) цих матеріалів дорівнює $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ та $45 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ відповідно. КТР вісмуту в тригональній площині дорівнює $10.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Таким чином, підкладки зі слюди викликають деформацію площинного розтягування, а підкладки з поліаміду - деформацію площинного стиснення плівки за температур нижче температури формування плівки.

Для отримання плівок з різним досконалістю структури використовувалися різні методи. В якості основного методу отримання тонкоплівкових зразків використовувався метод термічного осадження в глибокому вакуумі (10^{-5} Торр). При цьому для плівок твердого розчину вісмут-сурма використовувався метод дискретного випаровування, що дозволяє отримувати гомогенний розподіл компонентів твердого розчину по всьому об'єму. Таким методом за оптимальних умов отримання [14] вдається отримувати плівки з розмірами кристалітів, які більш ніж на порядок перевищують товщину плівки (для вісмуту) і в кілька разів перевищують товщину плівки (для твердого розчину вісмут-сурма). З метою отримання плівок з монокристалічною структурою використовувався метод зонної перекристалізації плівки під захисним покриттям [8]. З метою отримання плівок з розмірами блоків порядку товщини плівки використовувалася методика, заснована на вирощуванні плівки у високому вакуумі на попередньо сформованих нанокластерах [15]. Структура плівок контролювалася методами атомно-силової мікроскопії та рентгеноструктурним аналізом. Всі плівки мали орієнтацію площини (111) паралельну площині підкладки.

На отриманих плівках були досліджені температурні залежності термоЕРС і питомого опору в інтервалі температур 77-300 К за ступінчастої зміни температури зі стабілізацією температури в точці вимірювання. Для вимірювання термоЕРС використовувалась методика, що виключає спотворення елементами установки природної деформації в системі плівка-підкладка. Цю методику описано у праці [16].

Експериментальні результати та їх обговорення

Як було зазначено у вступі, в плівках вісмуту межі кристалітів і поверхня півки по-різному обмежують рухливість електронів і дірок, що призводить до суттєвих змін значення коефіцієнта Хола в залежності від співвідношення товщини півки та розмірів кристалітів. Поверхнею за низьких температур більшою мірою обмежується рухливість електронів, а межами кристалітів – рухливість дірок. З метою вивчення впливу вищевказаного явища на термоЕРС, яка є, як і ефект Хола, різницеvim ефектом, досліджені півки вісмуту на слюді мали істотні відмінності в розмірах кристалітів. Досліджувалися півки з розмірами кристалітів, порядку товщини півки (№ 1, 4 на рис. 1 і 2), отримані з використанням нано кластерів вісмуту відповідно до методики, розробленої в роботі [15].

На рис 1 і 2 наведені температурні залежності термоЕРС і питомого опору півок вісмуту товщиною 300 нм (№1, 2, 3) і 1000 нм (№4, 5, 6).

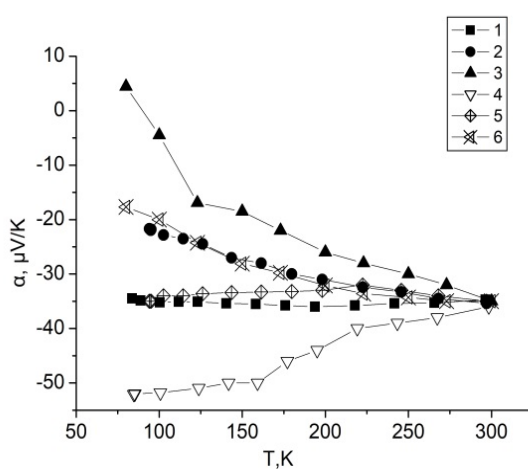


Рис. 1. Залежність термоЕРС від температури для півок вісмуту на підкладці зі слюди

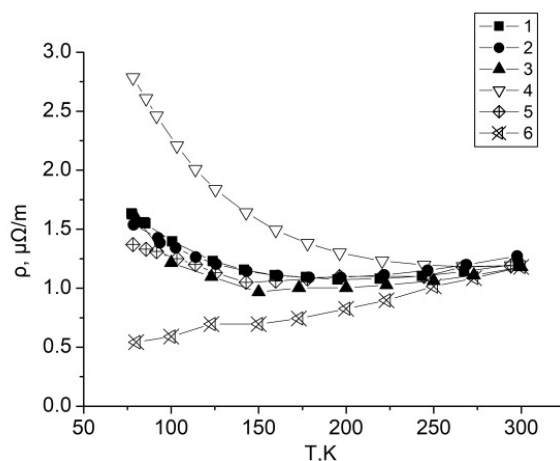


Рис. 2 Залежність питомого опору від температури для півок вісмуту на підкладці зі слюди

З представлених залежностей видно, що для плівок однакової товщини при зменшенні розмірів кристалітів відбувається зростання абсолютного значення термоЕРС при низьких температурах, що, як і для ефекту Хола, обумовлено істотно більшим обмеженням межами кристалітів рухливості дірок в порівнянні з рухливістю електронів. Для плівки №4 абсолютне значення термоЕРС за 77 К перевищує аналогічне значення для масивного вісмуту ($\alpha_{11} = -45$ мкВ/К). При цьому, вплив кристалітів на рухливість для плівок, отриманих з використанням нанокластерів вісмуту, може істотно варіюватися від зразка до зразка.

У роботах [1, 2] вперше було теоретично показано, що квантування енергії носіїв заряду в тонких плівках і нитках може призводити до зростання термоЕРС і істотного збільшення ZT . Істотне зростання термоЕРС в тонких плівках внаслідок квантового розмірного ефекту повинно відбуватися за товщин h , порівняних з довжиною хвилі де Бройля носіїв заряду. В монокристалах вісмуту носії заряду мають досить велике значення $\lambda = 2\pi\hbar/\sqrt{2E_F m^*}$, яке в напрямку осі $C3$ складає 67 нм для електронів і 11 нм для дірок за температури 77 К. У даній роботі зроблено спробу експериментального виявлення впливу квантового розмірного ефекту на термоелектричні властивості тонких плівок вісмуту на слюді.

На рис. 3 наведено температурні залежності термоЕРС плівок вісмуту товщиною від 10 нм до 1 мкм, отриманих методом термічного напилення при оптимальних умовах [14] с відпалом. З представлених залежностей видно, що за низьких температур для плівок товщиною від 1 мкм до 27 нм відбувається зменшення абсолютного значення негативної за знаком термоЕРС зі зменшенням товщини плівки, і для найтоншої плівки термоЕРС за низької температури переходить в позитивну область. При цьому внаслідок особливостей формування тонкоплівкових структур при зменшенні товщини плівок відбувається зростання відношення розмірів кристалітів до товщини плівки (D/h). Як було зазначено вище в цьому випадку при зменшенні товщини плівки більш істотно обмежується рухливість електронів, по відношенню до рухливості дірок, що і призводить до зменшення внеску електронів в термоЕРС і зменшення її абсолютного значення для більш тонких плівок. Однак, для плівок товщиною менше 27 нм при низьких температурах починається зростання абсолютного значення термоЕРС (вставка рис. 3), при цьому залежність від товщини D/h залишається такою ж, як і для плівок більшої товщини, тому зміна характеру товщинною залежності термоЕРС для плівок товщиною менше 27 нм не може бути обумовлено різним обмеженням рухливості електронів і дірок поверхнею і кордонами кристалітів. Ймовірно, збільшення абсолютного значення термоЕРС зі зменшенням товщини плівок вісмуту пов'язано зі зміною електронного енергетичного спектра внаслідок квантового розмірного ефекту. Для плівок товщиною менше 27 нм за низьких температурах починається зростання абсолютного значення термоЕРС (вставка рис. 3), при цьому залежність від відношення D/h залишається такою ж, як і для плівок більшої товщини, тому зміна характеру товщинною залежності термоЕРС для плівок товщиною менше 27 нм не може бути обумовлена різним обмеженням рухливості електронів і дірок поверхнею і межами кристалітів.

Для плівок вісмут-сурма даний ефект нами не виявлено, мабуть, внаслідок меншої ефективності відпалу з точки зору збільшення розмірів кристалітів (табл. 1), для тонких плівок твердого розчину вісмут-сурма і внаслідок цього менших значень довжини когерентності носіїв заряду в порівнянні з плівками чистого вісмуту, великі значення якої є критично важливими для спостереження когерентних явищ [17].

З використанням вимірних температурних залежностей питомого опору і термоЕРС для досліджуваних плівок розраховано фактор термоелектричної потужності P (рис. 4). Найбільш високе значення термоелектричної потужності для всіх температур спостерігається для плівок товщиною 500-1000 нм. Однак її залежність від товщини носить немонотонний характер за низьких температурах. Для плівок товщиною менше 27 нм починається зростання фактору потужності зі

зменшенням товщини плівки, що, як і зростання абсолютного значення термоЕРС, обумовлено зміною зонної структури плівок внаслідок прояву квантової когерентності носіїв заряду.

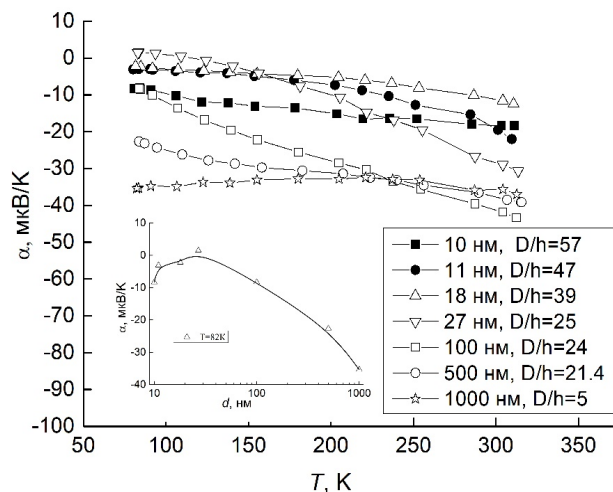


Рис. 3. Температурні залежності термоЕРС плівок вісмуту товщиною від 10 нм до 1 мкм. D/h – відношення розмірів кристалітів до товщини плівки

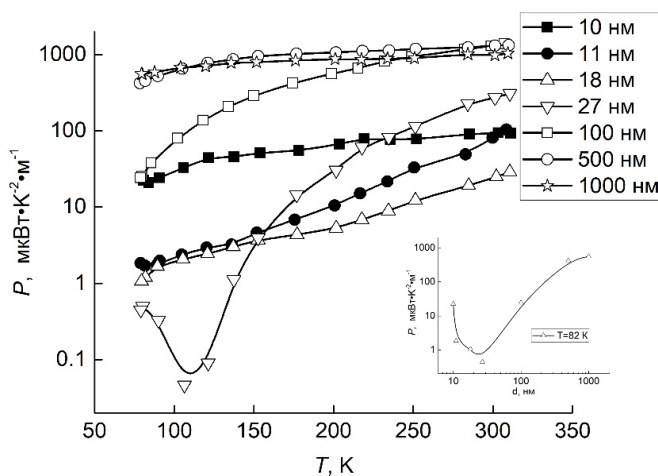


Рис. 4. Температурні залежності фактора термоелектричної потужності плівок вісмуту товщиною від 10 нм до 1 мкм. D/h – відношення розмірів кристалітів до товщини плівки

С метою експериментального дослідження можливості використання внутрішніх механічних напружень для поліпшення термоелектричних властивостей тонких плівок системи вісмут-сурма в даній роботі досліджено термоелектричні властивості тонких плівок твердого розчину вісмут-сурма на підкладках, які мають різний коефіцієнт температурного розширення: поліїмід та слюда (мусковіт). Під дією різниці температурного розширення матеріалів плівки і підкладки, плівки вісмуту на поліїміді переходять у стан площинного стиснення, а плівки вісмуту на слюді – у стан площинного розтягування за температури, нижчої від температури формування плівки. При аналізі

результатів використовувалися значення середнього розміру кристалітів плівок системи вісмут-сурма отримані методами, розвиненими у працях [18,19]. Ці значення наведено у табл. 1.

Збільшення концентрації сурми в плівці супроводжується збільшенням абсолютної величини термоЕРС за низької температури, що відображає зміну термоЕРС у монокристалах зі зміною їх складу (рис. 5 і рис.6). Зменшення товщини плівки в плівках твердого розчину вісмут-сурма призводить до зменшення термоЕРС за абсолютним значенням в низькотемпературній області, в той час як зменшення розмірів кристалітів призводить до збільшення її абсолютного значення в повній аналогії з плівками чистого вісмуту.

Вплив деформації плівки, внаслідок відмінності температурного розширення матеріалів плівки і підкладки, призводить до різного характеру температурних залежностей термоЕРС в плівках вісмут-сурма на підкладках із слюди та полііміду. Використання плівок на підкладках з великим температурним розширенням призводить до зменшення абсолютного значення термоЕРС, особливо в низькотемпературній області. Максимальне значення термоЕРС і фактора потужності відповідає плівкам $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ на слюді та полііміді (рис. 6, 7).

Таблиця 1

Розміри кристалітів плівок вісмуту і твердого розчину вісмут-сурма, мкм.

Матеріал підкладки	Товщина, мкм	1	0.5	0.25
	склад, ат.% Sb			
Слюда	0	5.4	10.7	3.6
	3	6.8	5.6	4.3
	5	8.2	1.8	3.2
	8	2.2	3.5	-
	12	3.8	3.2	2
	15	2.7	-	1.6
Полиимид	0	2.0	1.4	1.3
	3	1.0	0.8	0.6
	5	-	-	0.9
	8	1.2	0.7	-
	12	1.1	0.7	-
	15	1.0	-	-

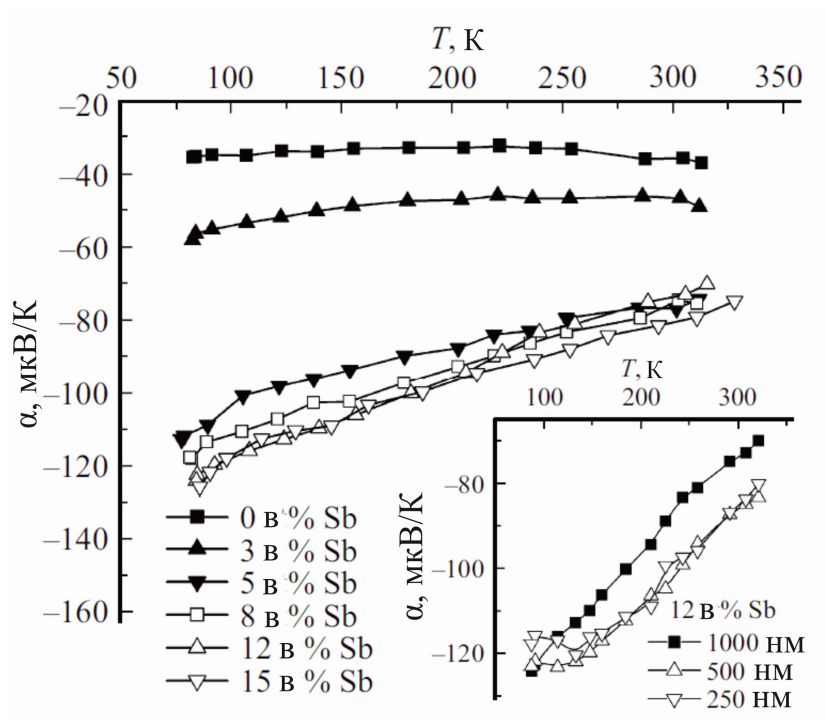


Рис. 5 ТермоЕРС плівок товщиною 1000 нм різного складу на слюді. На вставці — термоЕРС плівок $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ різних товщин.

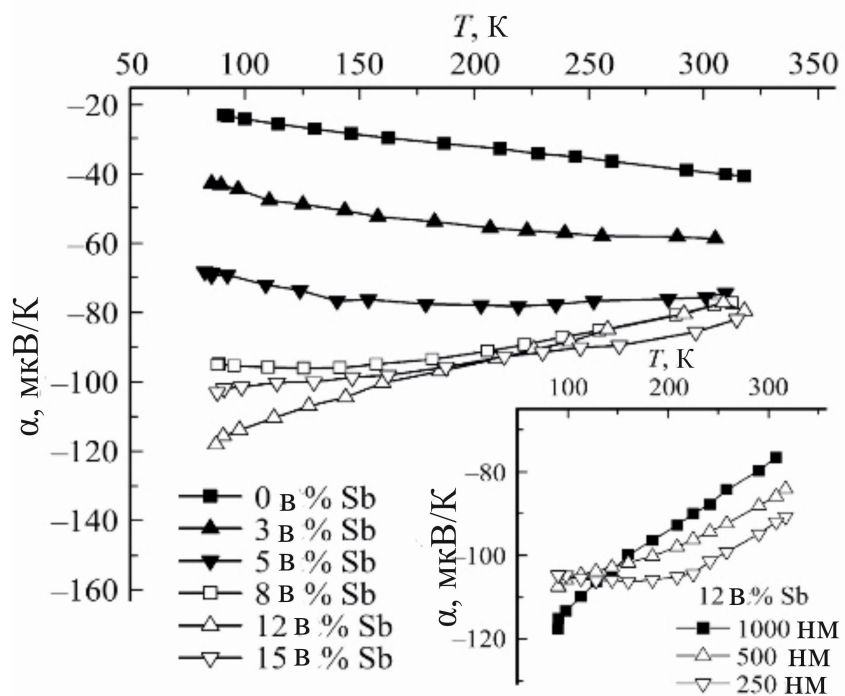


Рис. 6. ТермоЕРС плівок товщиною 1000 нм різного складу на поліміді. На вставці — термоЕРС плівок $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ різних товщин.

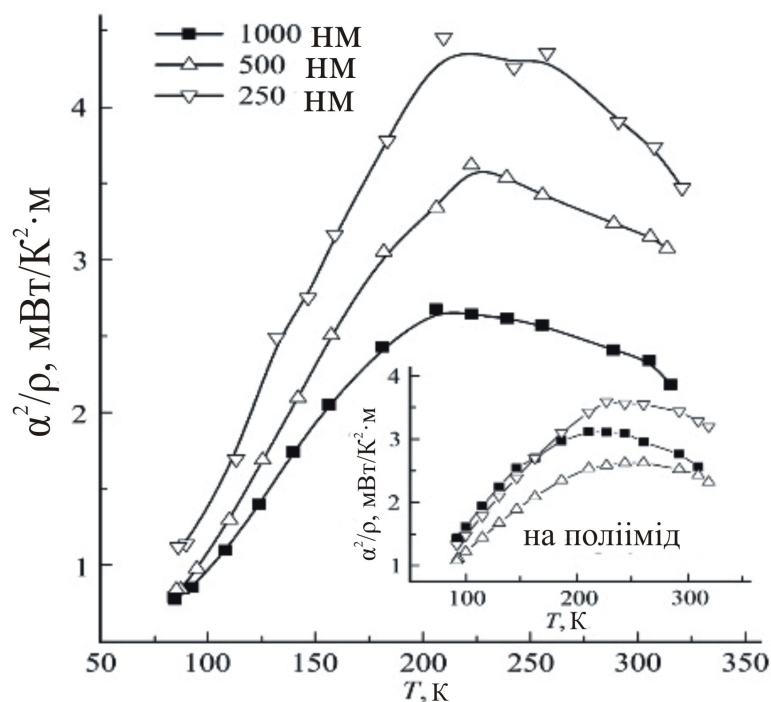


Рис. 7. Фактор потужності плівок $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ різної товщини на слоїді.
На вставці - фактор потужності плівок $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ різної товщини на Поліїміді.

Висновок

Встановлено, що використання плівок на підкладках з великим температурним розширенням призводить до зменшення термоЕРС, особливо в низькотемпературній області. Максимальне значення термоЕРС і фактора потужності відповідає товстим блоковим плівкам $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ на слоїді. В даних плівках отримано максимальне значення фактора потужності 4 мВт / К² · м за температур 200-250 К. Перспективним для досягнення високих значень термоелектричної потужності видається дослідження ультратонких монокристалічних плівок вісмут-сурма з досяжною мінімальною дефектністю і великою досконалістю поверхні, що забезпечує велику довжину когерентності носіїв заряду при переважанні дзеркального відбиття від поверхонь плівки. Однак у даний момент технологія створення таких плівок не відпрацьована.

Література

1. Hicks LD, Dresselhaus MS Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit // Phys. Rev. B. - № 47. - 1993. - P. 12727.
2. Dresselhaus M.S, Dresselhaus G., Sun X., Zhang Z., Cronin S.B, Koga T. Low-dimensional thermoelectric materials // Phys. Solid State. - № 41. - 1999. - P. 679.
3. Ніколаєва АА, Конопко Л.А., Гіцу Д.В., Хубер ТЕ, Пара Г.І., Цуркан А. Вплив магнітного поля, пружного розтягу і розмірів на термоелектричні властивості нанониток вісмуту // Термоелектрика. - № 2. - 2008. - С. 21-37.
4. Дмитрієв А. В., Звягін І. П., Сучасні тенденції розвитку фізики термоелектричних матеріалів // УФН. - Т. 180. - № 8. - 2010. - С. 821-838.
5. Ovsyannikov S.V, Shchennikov V.V., Vorontsov G.V., Manakov A.Y., Likhacheva A.Y., Kulbachinskii

- V.A. Giant improvement of thermoelectric power factor of Bi₂Te₃ under pressure // Journal of Applied Physics. - № 104. - 2008. - P. 053 713.
6. Demidov E.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Suslov A.V., Suslov M.V. The method of measuring the thermoelectric power in the thin films of the semimetals and narrow-gap semiconductors formed on the thin substrates // Journal of Physics: Conference Series. - № 857. - 2017. - P. 012 006.
 7. Грабів В.М., Демидов Е.В., Іванова Є. К., Комаров В.А., Каблукова Н.С., Крушельницький А.Н., Старіцин М.В. Вплив відпалу при температурі вище температури солідусу на структуру і гальваноманітних властивостей тонких плівок твердого розчину Ві₉₂Сb₈ // Журнал технічної фізики. - Т. 87. - № 7. - 2017. - С. 1071-1077.
 8. Grabov V.M., Komarov V.A., Demidov E.V., Khristich E.E. The occurrence of the classic size effect in single crystal bismuth films // Moldavian Journal of the Physical Sciences. - Vol. 10. - № 1. - 2011. - P. 87-95.
 9. Грабов В.М., Демидов Є.В., Комаров В.А. Обмеження рухливості носіїв заряду в плівках вісмуту, обумовлене їх блоковою структурою // Поверхня. Рентгенівські, синхротронного і нейтронні дослідження. - № 2. - 2011. - С.81-85.
 10. Kusagaya K., Hagino H., Tanaka S. Miyazaki, K., Takashiri M. Structural and Thermoelectric Properties of Nanocrystalline Bismuth Telluride Thin Films Under Compressive and Tensile Strain // Journal of Electronic Materials. - Vol. 44. - № 6. - 2015. - P. 1632.
 11. Бухараева А. А., Звездин А. К., Пятаков А. П., Фетисов Ю. К. Стрейтроніка - новий напрямок мікро- і наноелектроніки і науки про матеріали // УФН. - Т. 188. - 2018. - С. 1288-1330.
 12. Ovsyannikov SV, Shchennikov VV, Vorontsov GV, Manakov AY, Likhacheva AY, Kulbachinskii VA Giant improvement of thermoelectric power factor of Bi₂Te₃ under pressure // Journal of Applied Physics. - № 104. - 2008. - P. 053 713.
 13. Nikolaeva A., Huber T., Konopko L., Tsurkan A. Features of Lifshits electron topological transitions induced by anisotropic deformation in thin wires of doped bismuth. // J. Low Temp. Phys. - № 159. - 2010. - P. 258.
 14. Грабов В.М., Демидов Є.В., Комаров В.А. Оптимізація режимів термічного осадження у вакуумі плівок вісмуту при контролі їх дефектності методом атомно-силової мікроскопії // Фізика твердого тіла. - Т 52. - № 6. - 2010. - С. 1219 - одна тисячу двісті двадцять дві.
 15. Грабов В.М., Демидов Є.В., Комаров В.А., Кисельова Н.І. Термоелектричні властивості плівок вісмуту, що мають наноблочну структуру // Термоелектрика. - № 4. - 2011. - С. 73-79.
 16. Demidov E.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Suslov A.V., Suslov M.V. The method of measuring the thermoelectric power in the thin films of the semimetals and narrow-gap semiconductors formed on the thin substrates // Journal of Physics: Conference Series. - № 857. - 2017. - P. 012 006.
 17. Демидов Є.В., Грабов В.М., Комаров В.А., Крушельницький А.Н., Суслов А.В., Суслов М.В. Особливості прояву квантового розмірного ефекту в явищах переносу в тонких плівках вісмуту на підкладках із слюди // Фізика і техніка напівпровідників. - Т. 53. - № 6. - 2019. - С.736-740.
 18. Грабов В.М., Демидов Е.В., Комаров В.А. Клімант М.М. Атомно-силова мікроскопія декорованих оксидуванням дефектів плівок вісмуту // Фізика твердого тіла. - Т. 51. - № 4. - 2009. - С. 800-802.
 19. Грабов В.М., Демидов Е.В., Комаров В.А. Атомно-силова мікроскопія плівок вісмуту // Фізика твердого тіла. - Т. 50. - №7. - 2008. - С. 1312-1316.

Надійшла до редакції 18.05.2020

Грабов В. М., докт. физ.-мат. наук, профессор

Демидов Е. В., канд. физ.-мат. наук

Комаров В. А., канд. физ.-мат. наук,

Суслов А. В., Герега В. А., Ефимов Д. Д.

Российский государственный педагогический университет
им. А. И. Герцена, наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, 191186, Россия

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ВИСМУТА И ТВЕРДОГО РАСТВОРА ВИСМУТ-СУРЬМА

Методом, исключающим возникновение внешних деформационных воздействий на систему пленка–подложка, были исследованы температурные зависимости удельного сопротивления и термоЭДС, рассчитан фактор термоэлектрической мощности в интервале температур 77-300К для пленок твердого раствора висмут-сурьма на подложках с различным коэффициентом температурного расширения. Установлено, что для получения максимальной термоЭДС критически важным является соотношения размера кристаллитов и толщины пленки, что обусловлено различным ограничением подвижностей электронов и дырок поверхностью и границами кристаллитов. Максимальное значение термоЭДС и фактора мощности соответствует толстым блочным пленкам $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ на слюде. Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Минпросвещения России (проект № FSZN-2020-0026). Библ. 19, рис. 7, табл. 1.

Ключевые слова: висмут, висмут-сурьма, термоЭДС, размерный эффект, фактор мощности

V.M.Grabov, doct. phys.– math. sciences, professor,

E.V. Demidov, cand. phys.– math. sciences,

V.A.Komarov, cand. phys.– math. sciences, docent,

A.V. Suslov, V.A.Gerega, D.D.Yefimov

The Herzen State Pedagogical University,
48 Moyka Embankment, St-Petersburg, 191186, Russia

THERMOELECTRIC PROPERTIES OF THIN FILMS OF BISMUTH AND BISMUTH-ANTIMONY SOLID SOLUTION

The temperature dependences of the resistivity and thermoEMF were investigated by the method that excludes the occurrence of external strain in the film-substrate system, and the thermoelectric power factor was calculated in the temperature range of 77 to 300K for bismuth-antimony solid solution films on substrates with different thermal expansion coefficients. It has been found that to get the maximum thermoEMF, the ratio of the crystallite size and film thickness is critically important, which is due to the different confinement of electrons and holes mobility by the surface and crystallite boundaries. The

maximum thermoEMF and power factor correspond to thick block films of $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ on mica. The research was supported by the Ministry of Education of the Russian Federation as part of a state assignment (project No. FSZN-2020-0026). Bibl. 19, Fig. 7, Tabl. 1.

Key words: bismuth, bismuth-antimony, thermoEMF, size effect, power factor.

References

1. Hicks L.D., Dresselhaus M.S. (1993). Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit. *Phys. Rev. B*, 47, 12727.
2. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Sun X., Zhang Z., Cronin S. B., Koga T. (1999). Low-dimensional thermoelectric materials. *Phys. Solid State*, 41, 679.
3. Nikolaeva A.A., Konopko L.A., Gitsu D.V., Huber T.E., Para G.I., Tsurkan A. (2008). Influence of magnetic field, elastic tension and dimensions on the thermoelectric properties of bismuth nanowires. *J. Thermoelectricity*, 2, 21-37.
4. Dmitriev A.V., Zviagin I.P. (2010). Sovremennyye tendentsii razvitiia fiziki termoelektricheskikh materialov [Modern development trends of thermoelectric materials]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk- Advances in Physical Sciences*, 180(8), 821–838 [in Russian].
5. Ovsyannikov S.V., Shchennikov V.V., Vorontsov G.V., Manakov A.Y., Likhacheva A.Y., Kulbachinskii V.A. (2008). Giant improvement of thermoelectric power factor of Bi_2Te_3 under pressure. *J. Applied Physics*, 104, 053713.
6. Demidov E.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Suslov A.V., Suslov M.V. (2017). The method of measuring the thermoelectric power in the thin films of the semimetals and narrow-gap semiconductors formed on the thin substrates. *Journal of Physics: Conference Series*, 857, 012006.
7. Grabov V.M., Demidov E.V., Ivanova E.K., Komarov V.A., Kablukova N.S., Krushelnitskiy A.N., Staritsyn M.V. (2017). Influence of annealing at a higher than solidus temperature on the structure and galvanomagnetic properties of thin films of $Bi_{92}Sb_8$ solid solution. *Technical Physics*, 87(7), 1071-1077.
8. Grabov V.M., Komarov V.A., Demidov E.V., Khristich E.E. (2011). The occurrence of the classic size effect in single crystal bismuth films. *Moldavian Journal of the Physical Sciences*, 10(1), 87-95.
9. Grabov V.M., Demidov E.V., Komarov V.A. (2011). Ogranicheniie podvizhnosti nositelei zariada v plionkakh vismuta, obuslovennoie ikh blochnoi strukturoi [Restriction of charge carrier mobility in bismuth films due to their block structure]. *Poverkhnost', sinkhrotronnyie i neitronnyie issledovaniia – J.Surf.Invest.:X-Ray, Synchrotron Neutron Techn.*, 2, 81-85 [in Russian].
10. Kusagaya K., Hagino H., Tanaka S. Miyazaki, K., Takashiri M. (2015). Structural and thermoelectric properties of nanocrystalline bismuth telluride thin films under compressive and tensile strain. *J. Electronic Materials*, 44(6), 1632.
11. Bukharaieva A.A., Zvezdin A.K., Piatakov A.P., Fetisov Yu.K. (2018). Streintronika – novoie napravleniie mikro- i nanoelektroniki i nauki o materialakh [Straintronics – a new direction of micro- and nanoelectronics and materials science]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk- Advances in Physical Sciences*, 188, 1288-1330 [in Russian].
12. Ovsyannikov S.V., Shchennikov V.V., Vorontsov G.V., Manakov A.Y., Likhacheva A.Y., Kulbachinskii V.A. (2008). Giant improvement of thermoelectric power factor of Bi_2Te_3 under pressure. *J. Applied Physics*, 104, 053713.
13. Nikolaeva A., Huber T., Konopko L., Tsurkan A. Features of Lifshits electron topological transitions induced by anisotropic deformation in thin wires of doped bismuth. // *J. Low Temp. Phys.* - № 159. - 2010. - P. 258.

14. Grabov V.M., Demidov E.V., Komarov V.A. (2010). Optimizatsiia rezhimov termicheskogo osazhdeniia v vakuume plionok vismuta pri kontrole ikh defektnosti metodom atomno-silovoi mikroskopii [Optimization of thermal deposition in vacuum of bismuth films while monitoring their defectiveness by atomic force microscopy]. *Fizika Tverdogo Tela- Solid State Physics*, 52(6), 1219 – 1222 [in Russian].
15. Grabov V.M., Demidov E.V., Komarov V.A., Kiseleva N.I. (2011). Thermoelectric properties of bismuth films having nanoblock structure. *J. Thermoelectricity*, 4, 73-79.
16. Demidov E.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Suslov A.V., Suslov M.V. (2017). The method of measuring the thermoelectric power in the thin films of the semimetals and narrow-gap semiconductors formed on the thin substrates. *Journal of Physics: Conference Series*, 857, 012006.
17. Demidov E.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Krushelnitskiy A.N., Suslov A.V., Suslov M.V. (2019). Osobennosti proiavleniia kvantovo-razmernogo effekta v yavleniiakh perenosa v tonkikh plionkah vismuta na podlozhkakh iz sliudy [Peculiarities of quantum size effect manifestation in transport phenomena in bismuth thin films on mica substrates]. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov – Semiconductors*, 53(6), 736-740 [in Russian].
18. Grabov V.M., Demidov E.V., Komarov V.A., Klimantov M.M. (2009). Atomno-silovaia mikroskopiiia dekorirovannykh oksidirovaniem defektov plionok vismuta [Atomic-force microscopy of bismuth films decorated with oxidation of defects]. *Fizika Tverdogo Tela - Physics of the Solid State*, 51(4), 800-802 [in Russian].
19. Grabov V.M., Demidov E.V., Komarov V.A. (2008). Atomno-silovaia mikroskopiiia plionok vismuta [Atomic-force microscopy of bismuth films]. *Fizika Tverdogo Tela – Physics of the Solid State*, 50(7), 1312-1316 [in Russian].

Submitted 18.05.2020

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

До опублікування у фаховому журналі приймаються наукові праці, які ніколи не друкувалися раніше. Стаття має бути написана на актуальну тему, містити результати глибокого наукового дослідження, новизну та обґрунтування наукових висновків відповідно до мети статті (поставленого завдання).

Матеріали, що публікуються в журналу, підлягають внутрішньому та зовнішньому рецензуванню, яке здійснюють члени редакційної колегії та міжнародної редакційної ради журналу або фахівці відповідної галузі. Рецензування проводиться конфіденційно, У разі негативної рецензії чи наявності суттєвих зауважень стаття може бути відхилена або повернута авторові (авторам) на доопрацювання. У випадку, коли автор (автори) не погоджується(ються) з думкою рецензента, за рішення редакційної колегії може бути проведене додаткове незалежне рецензування. Після внесення автором змін відповідно до зауважень рецензента статті підписується до друку.

Редакційна колегія має право на відмову у публікації рукописів, що містять опубліковані раніше дані, а також матеріалів, які не відповідають профілю журналу або матеріалів досліджень, що були проведені з порушенням етичних норм (наприклад, конфлікти між авторами чи між авторами і організацією, плагіат і т. ін.). Редакційна колегія журналу залишає за собою право редагувати та скорочувати рукописи без порушення авторського змісту. Відхилені рукописи авторам не повертаються.

Подання рукопису до журналу

Рукопис статті подається до редакції журналу в паперовому варіанті у двох примірниках та в електронному вигляді на електронному носії (диск, флешка). Електронний варіант статті повинен повністю відповідати паперовому варіанту. Рукопис має бути підписаний всіма співавторами або відповідальним представником.

В окремих випадках допускається замість електронного носія (диск, флешка) направляти статтю електронною поштою.

Рукописи подаються англійською мовою для англійськомовних авторів. Для російськомовних та україномовних авторів - англійською мовою і, відповідно, російською чи українською. Формат сторінок А4. Кількість сторінок – не більше 15 (разом з літературою та розширеними анотаціями). За узгодженням з редакцією число сторінок може бути збільшено.

До рукопису додається:

- 1.Офіційний лист-направлення, підписаний керівником установи, де виконувалась робота.
2. Ліцензійний договір про передачу авторського права (форму договору можна отримати в редакції журналу або завантажити з сайту журналу – Договір.pdf). Ліцензійний договір набуває чинності після прийняття статті до друку. Підписання ліцензійного договору автором(ами) означає, що вони ознайомлені і згодні з умовами договору.
3. Відомості про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, вчене звання, вчена ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID (за наявності). Відомості про авторів подаються:
авторами з України трьома мовами – українською, російською та англійською;
авторами з країн СНД двома мовами – російською та англійською;
авторами з далекого зарубіжжя – англійською мовою.
4. Носій інформації з текстом статті, рисунками, таблицями, відомостями про авторів в електронному вигляді.
5. Кольорова фотографія автора(ів). Чорно-білі фотографії редакція журналу не приймає. При числі авторів більше двох їх фотографії не наводяться.

Вимоги до оформлення статті

Стаття має бути структурована за такими розділами:

- *Вступ*. Містить постановку проблеми, актуальність обраної теми, аналіз останніх досліджень і публікацій, мета і завдання.

- *Виклад основного матеріалу* дослідження і отриманих результатів.

- *Висновки*, де підведені підсумки роботи і перспективи подальших досліджень у цьому напрямі.

- *Список використаної літератури*.

Перша сторінка статті містить інформацію:

1. у верхньому лівому куті – індекс УДК (для авторів з України та країн СНД);
2. прізвище(а) та ініціали, вчена ступінь та вчене звання автора(ів);
3. назва установи, де працює автор(и); поштова адреса, номер телефону, адреса електронної пошти автора(ів);
4. назва статті;
5. анотація до статті – не більше 1 800 знаків. Анотація повинна відображати послідовну логіку опису результатів та описувати основні цілі дослідження, підсумовувати найбільш значимі результати;
6. ключові слова – не більше 8-ми слів.

Текст статті друкується шрифтом Times New Roman розміром 11 пт, міжрядковий інтервал 1.2 на папері формату А4, вирівнювання по ширині. У статті не повинно бути переносів слів.

Параметри сторінки: «дзеркальні поля» верхнє поле – 2.5 см, нижнє поле – 2.0 см, всередині – 2,0 см, ззовні – 3,0 см, від краю до колонтитула верхнього та нижнього – 1.27 см.

Графічні матеріали, фотографії подаються кольоровими, як виняток чорно – білими, у форматах .orj чи .cdr, допускається у форматах .jpg чи .tif. За бажанням автора таблиці і частина тексту також можуть бути кольоровими.

Рисунки друкуються на окремих сторінках. Текст на рисунках повинен бути виконаний шрифтом 10 пт. На графіках одиниці виміру вказуються через кому. Рисунки нумеруються в порядку їх розташування в тексті, частини рисунків нумеруються літерами – а, б, .. На звороті рисунка олівцем пишеться назва статті, автор(автори), номер рисунка. Скановані рисунки і графіки вставляти не допускається.

Таблиці подаються на окремих сторінках та повинні бути виконані з використанням табличного редактора MSWord. Використання символів псевдографіки для оформлення таблиць недопустиме.

Формули необхідно набирати у редакторах формул Equation або MatType. Статті з формулами, вписаними від руки, до друку не приймаються. Необхідно давати визначення (дефініцію) величин, які вперше вживаються у тексті, а далі користуватись відповідним терміном.

Підписи до рисунків і таблиць друкуються в рукописі після списку літератури.

Список використаних літературних джерел наводиться у кінці статті. Посилання на літературні джерела нумеруються послідовно в порядку їх цитування у тексті статті. Посилання на неопубліковані та незавершені роботи недопустимі.

Увага! У зв'язку із включенням журналу до міжнародних бібліографічно-реферативних баз даних, список літератури має складатися з двох блоків: ЛІТЕРАТУРА і REFERENCES (ця вимога діє і для англomовних статей):

ЛІТЕРАТУРА – джерела мовою оригіналу, оформлені відповідно до українського стандарту бібліографічного опису ДСТУ 8302:2015. За допомогою VAK.in.ua (<http://vak.in.ua>) Ви можете

автоматично, швидко і легко оформити Ваш «Список використаних джерел» відповідно до вимог Державної атестаційної комісії (ДАК) України та оформити посилання на наукові джерела в Україні зрозуміло та уніфіковано. У цьому порталі полегшено процедури оформлення наукових джерел при написанні Ваших публікацій, дисертацій та інших наукових робіт.

REFERENCES – той же список літератури, транслітерований в романському алфавіті (рекомендації за міжнародним бібліографічним стандартом APA-2010, правила до оформлення транслітерованого списку літератури References на сайті <http://www.dse.org.ua>, розділ для авторів).

Для пришвидшення публікації статті просимо дотримуватись наступних правил:

- У верхньому лівому куті першої сторінки статті – індекс УДК;
- ініціали та прізвище авторів;
- науковий ступінь, учене звання;

з нового рядка шрифтом Times New Roman розміром 12 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру;

- назва організації, адреса (вулиця, місто, індекс, країна), електронна адреса авторів;

з нового рядка на 1 см нижче ініціалів та прізвища авторів шрифтом Times New Roman розміром 11 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру;

о назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, заголовними буквами напівжирним шрифтом New Roman розмір 12 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру. Назва статті має бути конкретною і по можливості короткою;

- анотація розміщується на 1 см нижче назви статті шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, курсивом, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по ширині українською чи російською (для україномовних та російськомовних авторів відповідно) та англійською мовами;

- ключові слова розміщуються нижче анотації шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по ширині. Мова ключових слів відповідає мові анотації. Заголовок «Ключові слова» - шрифт Times New Roman, розмір 10 пт, напівжирний;

- основний текст статті розміщується на 1 см нижче анотації з абзацу 1 см, шрифт Times New Roman, розмір 11 пт, міжрядковий інтервал 1,2 вирівнювання по ширині;

формули набирають у редакторі формул шрифтами: Symbol, Times New Roman. Розмір шрифтів: «звичайний» - 12 пт, «крупний індекс» - 7 пт, «дрібний індекс» - 5 пт, «крупний символ» - 18 пт, «дрібний символ» - 12 пт). Формула розміщується по тексту, вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка, нумерація формул у круглих дужках справа;

- розмірності всіх величин, що використовуються в статті, подаються в системі СІ, використовувані символи повинні бути пояснені;

- рисунки розміщуються по тексту. Рисунки та фотографії повинні бути чіткими і контрастними; осі графіків - паралельними до країв листка, усуваючи тим самим можливість появи зрушення кутів при масштабуванні; рисунки у журнал подаються кольоровими, чорно-білі - редакція журналу не приймає;

- таблиці розміщують по тексту. Ширина таблиці повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею вказують її порядковий номер, вирівнювання по правому краю. Нумерація таблиць по всьому тексту статті наскрізна. Назва таблиці розміщується під її номером, вирівнювання по центру;

• список літератури наводять у кінці статті. Посилання на літературу вказують за текстом в квадратних дужках. Послідовність джерел у списку літератури має відповідати порядку їх згадування в тексті. Нижче наведені приклади різних типів посилань на літературу.

Приклади оформлення посилань на літературні джерела для ЛІТЕРАТУРИ

Статті в журналах

Анатичук Л.І., Михайловський В.Я., Максимук М.В., Андрусак І.С. Експериментальні дослідження термоелектричного автомобільного передпускового нагрівача на дизельному паливі. *Термоелектрика*. 2016. №4. С.84–94.

Книги

Анатичук Л.І. *Термоелементи и термоэлектрические устройства. Справочник*. Киев, Наукова думка, 1979. 768 с.

Патенти

Патент України № 85293. Анатичук Л.І., Лусте О.Я., Ніцович О.В. Термоелемент

Матеріали конференцій

Лисько В.В. *Современное состояние и ожидаемый прогресс в метрологии термоэлектрических материалов*. Матеріали XVII Міжнародного форуму по термоелектричеству (14-18 мая 2017, г. Белфаст), Черновці, 2017. 64 с.

Автореферати дисертацій

Кобілянський Р.Р. *Термоелектричні прилади для лікування захворювань шкіри.*: автореф. дис. фіз.-мат. наук. Чернівці, 2011. 20 с.

Приклади оформлення посилань на літературні джерела для REFERENCES

Статті в журналах

Gorskiy P.V. (2015). Ob usloviakh vysokoi dobrotnosti i metodika poiska perpektivny sverhreshetochny termoelektricheskikh materialov [On the conditions of high figure of merit and methods of search for promising superlattice thermoelectric materials]. *Termoelektrichestvo - J.Thermoelectricity*, 3, 5 – 14 [in Russian].

Книги

Anatychuk L.I. (2003). *Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.

Патенти

Patent of Ukraine № 85293. Anatychuk L. I., Luste O.Ya., Nitzovych O.V. Thermoelements [In Ukrainian].

Матеріали конференцій

Rifert V.G.. Intensification of heat exchange at condensation and evaporation of liquid in 5 flowing-down films. In: *Proc. of the 9th International Conference Heat Transfer*. May 20-25, 1990, Israel.

Автореферати дисертацій

Mashukov A.O. *Efficiency hospital state of rehabilitation of patients with color cancer*. Phd (Med.) Odesa, 2011 [In Ukrainian].