

РЕЦЕНЗІЯ

**доктора фізико-математичних наук, професора,
професора кафедри комп'ютерних систем та мереж
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
ДЕЙБУКА Віталія Григоровича
на дисертаційну роботу Кречун Марії Миколаївни
на тему «Вплив фазової стабільності системи Fe-Ni-Cr-W на формування
гальванічних антидифузійних структур у термоелектричних
перетворювачах енергії на основі матеріалів Ві-Те»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
спеціальність 105 – Прикладна фізика та наноматеріали,
галузь знань 10 – Природничі науки**

Актуальність дисертаційного дослідження

Дисертаційна робота Кречун Марії Миколаївни присвячено вирішенню важливої науково-технічної проблеми – підвищенню стабільності, надійності та довговічності термоелектричних перетворювачів енергії (ТЕП) на основі матеріалів системи Ві-Те шляхом обґрунтування складу та формування ефективних гальванічних антидифузійних структур. Актуальність теми дослідження безпосередньо зумовлена стрімким розвитком альтернативної енергетики, систем рекуперації тепла, автономного живлення та космічної техніки, де ТЕП мають суттєві переваги завдяки високій механічній надійності, компактності, екологічній чистоті та відсутності рухомих частин. Проте широке практичне впровадження таких пристроїв наразі обмежене деградацією контактних з'єднань через взаємну дифузію атомів на межі «термоелектричний матеріал – металевий контакт», що призводить до зростання електричного й теплового опору та утворення небажаних інтерметалічних сполук. Застосування багатокomпонентних бар'єрних шарів на основі системи Fe-Ni-Cr-W є перспективним і сучасним підходом до розв'язання цієї проблеми. Особливу актуальність та наукову вартість роботі надає оригінальний підхід авторки, який полягає у поєднанні аналізу фазових діаграм стану (подвійних, потрійних та

четверних систем) із розрахунковими методами визначення параметрів хімічного зв'язку (ефективних радіусів, ефективних зарядів та енергій міжатомної взаємодії) для теоретичного прогнозування стабільності бар'єрних шарів.

Практична цінність роботи.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційного дослідження Кречун М. М. полягає у створенні науково обґрунтованого підґрунтя для розробки та оптимізації технологічних процесів формування гальванічних бар'єрних покриттів з підвищеною термічною та дифузійною стабільністю на поверхні термоелектричних матеріалів. Головними прикладними результатами роботи є:

1. Обґрунтування вибору оптимального складу ефективних багатокомпонентних антидифузійних шарів на основі системи Fe–Ni–Cr–W, що дозволяє суттєво уповільнити процеси деградації контактних з'єднань у термоелектричних модулях на основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3) та продовжити термін їх експлуатації.
2. Розробка та впровадження універсального розрахункового підходу до аналізу параметрів хімічного зв'язку (ефективних радіусів, зарядів та енергій міжатомної взаємодії), який може бути безпосередньо застосований у матеріалознавстві при проектуванні нових багат шарових металевих покриттів та комутаційних структур із прогнозованими захисними властивостями.
3. Оптимізація геометричних та конструкційних параметрів контактних і з'єднувальних елементів термоелектричних модулів, що дозволяє значно підвищити їх стійкість до циклічних механічних та термічних навантажень.

Отримані авторкою результати безпосередньо спрямовані на підвищення надійності вітчизняних термоелектричних пристроїв і можуть бути впроваджені на підприємствах та в науково-дослідних установах, які займаються розробкою технологій альтернативної енергетики, сенсорної техніки та автономних систем енергозабезпечення.

Аналіз змісту дисертації та основні результати роботи

Дисертаційна робота Кречун М. М. має класичну для кваліфікаційних наукових праць структуру, побудовану за чітким логічним принципом, що дозволяє повною мірою розкрити мету та завдання дослідження. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів (основної частини), висновків, списку використаних джерел та додатків. У **Вступі** авторкою обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт, предмет та методи досліджень, сформульовано мету, завдання, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також наведено відомості щодо апробації матеріалів роботи та опублікованих праць. В **Основній частині** дисертації послідовно висвітлено ключові етапи наукового пошуку:

— Здійснено глибокий аналітичний огляд літературних джерел щодо сучасного стану розробки термоелектричних перетворювачів енергії, проаналізовано природу та механізми деградації контактних вузлів ТЕП на основі матеріалів системи Bi–Te, а також обґрунтовано необхідність застосування багатокомпонентних бар'єрних покриттів. Детально викладено методологію досліджень, що базується на аналізі фазових діаграм стану подвійних, потрійних а четверних систем (зокрема, Fe–Ni–Cr–W та Bi–Sn–Te). Особливу увагу приділено теоретико-розрахунковому аналізу параметрів хімічного зв'язку, зокрема визначенню ефективних радіусів, ефективних зарядів та енергій дисоціації (міжатомної взаємодії). Наведено результати математичного та термодинамічного моделювання фазової стабільності, обґрунтовано оптимальні концентраційні межі системи Fe–Ni–Cr–W для

формування стійких гальванічних антидифузійних шарів. Описано оптимізацію конструкційних рішень для контактних і з'єднувальних елементів термоелектричних модулів, що підтверджує їхню підвищену стійкість до циклічних механічних навантажень. У **Загальних висновках** узагальнено та підсумовано головні наукові й практичні результати дисертаційної роботи, які повністю відповідають поставленим завданням.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій.

Достовірність та обґрунтованість сформульованих у дисертації наукових положень, висновків і практичних рекомендацій забезпечується глибоко продуманою та логічно послідовною методологією дослідження. Високий ступінь обґрунтованості результатів досягнуто завдяки:

- **Комплексному підходу**, що базується на гармонійному поєднанні класичних методів аналізу фазових діаграм стану (як подвійних, потрійних, так і складних четвертих систем Fe–Ni–Cr–W та Bi–Sn–Te) із сучасними розрахунково-теоретичними методами оцінки параметрів хімічного зв'язку.
- **Використанню коректних фізико-математичних моделей** для розрахунку ефективних радіусів, ефективних зарядів та енергій дисоціації (міжатомної взаємодії), що дозволило отримати об'єктивні кількісні дані для прогнозування стабільності бар'єрних шарів.
- **Узгодженості теоретичних розрахунків** із фундаментальними положеннями фізики напівпровідників, матеріалознавства та термодинаміки гетерогенних систем.

Усі сформульовані авторкою висновки та рекомендації безпосередньо впливають із виконаного обсягу досліджень, логічно пов'язані з поставленими завданнями і не містять внутрішніх суперечностей.

Наукова новизна отриманих результатів.

Дисертаційне дослідження Кречун М. М. характеризується високим науковим рівнем і містить низку нових положень та результатів, які суттєво розширюють уявлення про фізико-хімічні процеси на межі поділу фаз у термоелектричних пристроях. Основні наукові результати, що визначають новизну роботи, полягають у наступному:

1. Вперше запропоновано та науково обґрунтовано комплексний підхід, який поєднує аналіз фазових діаграм стану (подвійних, потрійних та четверних систем) із розрахунковими методами параметрів хімічного зв'язку для теоретичного прогнозування стабільності бар'єрних шарів.
2. Вперше встановлено кількісні закономірності впливу фазової стабільності системи Fe–Ni–Cr–W на дифузійні процеси та кінетику формування гальванічних антидифузійних структур на термоелектричних матеріалах системи Bi–Te.
3. Дістали подальшого розвитку уявлення про природу міжатомної взаємодії на гетерограницях «напівпровідник – метал» шляхом розрахунку ефективних радіусів, ефективних зарядів та енергій дисоціації атомів у багатокомпонентних системах, що дозволило визначити межі фазової стабільності захисних покриттів.
4. Науково обґрунтовано взаємозв'язок між оптимізацією конструкційних параметрів контактних елементів (комутаційних структур) та підвищенням стійкості термоелектричних модулів до циклічних термічних і механічних навантажень.

Додатковим підтвердженням достовірності є позитивна оцінка результатів науковою спільнотою на міжнародних конференціях та публікації у виданнях, що входять до наукометричних баз Scopus.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами

Дисертація Кречун М. М. виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Дослідження є складовою частиною планової наукової теми кафедри термоелектрики та медичної фізики «Фізика, матеріалознавство та прикладні застосування термоелектрики» (номер державної реєстрації 0121U110896). Отримані авторкою результати сприяли успішній реалізації етапів НДР, що підтверджує тісний зв'язок дисертації з науково-технічними програмами університету.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Основні наукові положення, теоретичні висновки та практичні результати дисертаційного дослідження достатньою мірою відображені в опублікованих працях здобувача. Загальна кількість публікацій та їхній рівень повністю відповідають встановленим нормам для робіт на здобуття ступеня доктора філософії. Загалом за темою дисертації опубліковано 17 наукових праць, що повністю розкривають зміст та результати дослідження. Серед них: 7 статей опубліковано у фахових наукових журналах (зокрема, що входять до затвердженого переліку наукових фахових видань України та міжнародних наукометричних баз даних); 6 публікацій – у збірниках матеріалів доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях, що підтверджує належну апробацію матеріалів роботи; отримано 4 патенти України на корисні моделі, які безпосередньо засвідчують практичну цінність, новизну та прикладну значущість розроблених авторкою технічних рішень і технологічних підходів. Опубліковані праці повною мірою відображають ключові положення, структуру та висновки дисертаційної роботи, забезпечуючи відкритість наукових результатів для академічної спільноти.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження

Оцінюючи позитивно науковий рівень, обґрунтованість та практичне значення дисертаційного дослідження Кречун М. М., до роботи варто висловити кілька зауважень та побажань, які не знижують її загальну високу цінність:

1. У тексті дисертації значна увага приділяється напівемпіричним методам аналізу параметрів хімічного зв'язку (ефективних радіусів, зарядів та енергій міжатомної взаємодії) для систем Fe–Ni–Cr–W та Bi–Sn–Te. В той же час не проведено достатнього аналізу відомих першопринципних методів розрахунку цих характеристик. Було б доцільно ширше висвітлити у висновках розділів, наскільки точно узгоджуються проведені розрахункові дані з наявними експериментальними фізико-хімічними характеристиками досліджуваних гальванічних покриттів.
2. При аналізі фазової стабільності багатокомпонентних систем та прогнозуванні бар'єрних властивостей антидифузійних структур авторкою розглянуто широкий спектр чинників. Проте у роботі варто було б детальніше конкретизувати температурний діапазон, у якому прогнозована стабільність інтерфейсів «термоелектричний матеріал – бар'єрний шар» залишається термодинамічно та кінетично надійною під час довготривалої експлуатації.
3. В роботі обґрунтовано оптимізацію конструкції контактних і з'єднувальних елементів для підвищення стійкості модулів до механічних навантажень. Бажано було б навести додаткові пояснення чи графічні залежності, що ілюструють вплив товщини сформованого гальванічного шару на виникнення внутрішніх механічних напружень у комутаційній структурі.
4. У тексті дисертації та автореферату (анотації) трапляються поодинокі стилістичні неточності та друкарські помилки, які, однак, є типовими для

робіт такого значного обсягу і не впливають на загальне позитивне враження від дисертації.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Кречун Марії Миколаївни на тему «*Вплив фазової стабільності системи Fe–Ni–Cr–W на формування гальванічних антидифузійних структур у термоелектричних перетворювачах енергії на основі матеріалів Bi–Te*» є завершеною, самостійно виконаною кваліфікаційною науковою працею, яка містить нові, науково обґрунтовані результати, що розв'язують важливу науково-технічну проблему матеріалознавства термоелектричних пристроїв. Дисертація характеризується внутрішньою єдністю, логічною послідовністю викладу та належним рівнем апробації. Наукові положення, висновки та практичні рекомендації, сформульовані здобувачем, є достовірними та достатньою мірою відображені в опублікованих працях, зокрема у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus. Під час аналізу роботи не виявлено порушень принципів академічної доброчесності.

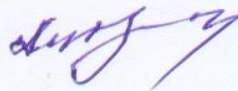
За своєю актуальністю, науково-теоретичним рівнем, обґрунтованістю результатів та практичним значенням, дисертаційне дослідження повністю відповідає вимогам пунктів 6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р. та № 507 від 03.05.2024 р.).

З огляду на вищевикладене, вважаю, що автор роботи **Кречун Марія Миколаївна** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у

галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Рецензент:

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних систем та мереж
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича



Віталій ДЕЙБУК

