

В І Д Г У К

офіційного опонента на дисертаційну роботу

РОМАКИ ВІТАЛІЯ ВОЛОДИМИРОВИЧА

«Розвиток фізико-хімічних основ створення нових термоелектричних матеріалів з покращеними функціональними властивостями»,

представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство

Актуальність роботи.

В основі пошуку нових та більш ефективних методів перетворення теплової енергії в електричну лежить вирішення проблеми створення нових матеріалів термоперетворювачів. Вони дадуть змогу зробити таке перетворення енергії економічно доцільним та розширити температурні межі використання при збереженні стабільних та відтворюваних характеристик.

Дисертаційна робота Ромаки В.В. присвячена розвитку фізико-хімічних основ створення нових термоелектричних матеріалів на основі інтерметалідів з покращеними функціональними властивостями для вирішення актуальної та важливої наукової та прикладної проблеми підвищення ефективності перетворення теплової енергії в електричну в термоелектричних матеріалах.

Не зважаючи на значний обсяг досліджень термоелектричних матеріалів зі структурою MgAgAs , як в Україні, так і закордоном *не були розроблені шляхи* прогнозованого отримання нових термоелектричних матеріалів цього класу з покращеними функціональними властивостями, що обумовлено складністю інтерпретації результатів досліджень, які лежать на стику технічних та природничих наук.

Актуальність теми дисертаційної роботи Ромаки В.В. визначається необхідністю розвитку фізико-хімічних основ створення нових термоелектричних матеріалів на основі інтерметалідів з покращеними термоелектричними характеристиками. Розглянута робота має як теоретичне значення, для розуміння природи фізичних процесів у напівпровідникових термоелектричних матеріалах, так і практичне, для отримання нових матеріалів з покращеними термоелектричними характеристиками.

Мета роботи - розвиток фізико-хімічних основ прогнозування та отримання нових термоелектричних матеріалів на основі інтерметалідів з покращеними функціональними властивостями, науковий доробок дисертанта засвідчує пріоритетність вітчизняних досліджень цього класу матеріалів.

Дисертаційна робота Ромаки В.В. виконувалась у рамках *пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки України*, зокрема, у межах держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України та міжнародних грантів:

- «Дослідження термоелектричних інтерметалічних напівпровідникових матеріалів ZrNiSn та TiNiSn як робочих елементів енергоощадних джерел електричного струму» (№ 0106U005428);
- «Багатокомпонентні інтерметаліди як основа пошуку нових термоелектричних та магнітних матеріалів» (№ 0109U002069);

- «Нові інтерметаліди: синтез, структура та кристалохімічні закономірності» (№ 0109U002070);
- «Електротранспортні та магнітні властивості нових інтерметалідів та їх зв'язок із кристалічною структурою» (№ 0106U001299);
- «Оптимізація функціональних властивостей конструкційних матеріалів методами інженерії поверхні з використанням комп'ютерного моделювання» (№ 0110U001119);
- «Оптимізація електрофізичних і магнітних властивостей твердих розчинів у металічних системах» (№ 0111U001088);
- «Ресурсозберігаючі технології створення функціонально градієнтних матеріалів та систем комп'ютерного конструювання їх структури з нановимірною геометрією» (№ 0112U001210);
- «Оптимізація електрофізичних властивостей твердих розчинів металічних систем» (№ 0112U001210);
- «Нові матеріали для термоелементів на основі інтерметалічних напівпровідників» (№ 0114U001679);
- «Дослідження температурної та часової стабільності і відтворюваності характеристик чутливих елементів термоперетворювачів на основі інтерметалічних напівпровідників» (№ 0114U00564);
- «Ernst-Mach-Stipendien (Ernst-Mach weltweit)» (№ ICM-2010-00709, Австрія);
- «Stipendien der Stipendienstiftung der Republik Österreich (Postdoc)» (№ ICM-2011-03358, Австрія);

Об'єкт дослідження автором сформульовано як закономірності температурних та концентраційних залежностей термоелектричних характеристик, а **предмет дослідження** – термоелектричні матеріали, створені на основі базових інтерметалідів ZrNiSn, HfNiSn, TiNiSn, VFeSb та ZrCoSb.

Для досягнення поставленої мети дисертантом сформульовані такі завдання:

- Дослідити матеріалознавчі проблеми прогнозування та отримати нові термоелектричні матеріали з високою ефективністю перетворення теплової енергії в електричну.

- Встановити фазовий і хімічний склад сплавів у системах за участю стануму, стибію, перехідних та рідкісноземельних металів (РЗМ).

- Побудувати модель кристалічної та електронної структур як вихідних, так і створених термоелектричних матеріалів.

- Встановити вплив легувальних елементів, зокрема, перехідних та рідкісноземельних металів, на енергетичні характеристики матеріалів та визначити механізми електропровідності на основі дослідження температурних та концентраційних залежностей електрокінетичних і магнітних властивостей базових інтерметалідів та твердих розчинів на їхній основі.

- Встановити взаємозв'язок результатів розрахунку електронної будови і фізичних властивостей сплавів базових інтерметалідів та твердих розчинів з моделлю їхньої кристалічної структури для прогнозування функціональних характеристик термоелектричних матеріалів.

- Дослідити умови створення нових термоелектричних матеріалів з високою ефективністю перетворення теплової енергії в електричну.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в тому, що дисертантом було:

1. Вперше розроблено підходи для створення нових термоелектричних матеріалів з високою ефективністю перетворення теплової енергії в електричну, які базуються на запропонованому способі оптимізації структури матеріалу. Даний спосіб полягає у моделюванні просторового розподілу атомів у структурі матеріалу шляхом ітераційного наближення розрахованих методом ККР-СПА енергетичних характеристик (густина електронних станів на рівні Фермі, ширина забороненої зони тощо) для кожного варіанту моделі структури з отриманими експериментально при вимірюванні електрокінетичних та магнітних параметрів.

2. Використання запропонованого способу оптимізації термоелектричних характеристик матеріалу дозволило вперше виявити у базових інтерметалідах ZrNiSn , HfNiSn , TiNiSn , VFeSb та ZrCoSb структурні дефекти та встановити їхню донорну природу. Це дозволило пояснити причину нестабільності їхніх характеристик. Запропоновано механізм стабілізації термоелектричних характеристик вихідних матеріалів шляхом відповідного легування, яке «заліковує» структурні дефекти і забезпечує відтворюваність властивостей матеріалів до температури гомогенізуючого відпалювання.

3. Вперше встановлено механізми електропровідності та діамagnetизм базових інтерметалідів. Показано, що за низьких температур ($T = 80 \div 100 \text{ K}$) електрони є домінуючими носіями струму, а основним механізмом електропровідності є стрибковий механізм по локалізованих станах домішкової донорної зони, породженої дефектністю структури вихідного матеріалу. Підвищення температури ($T > 100 \text{ K}$) приводить до збільшення числа вільних електронів, що супроводжується зменшенням значень питомого електроопору та коефіцієнта термо-ЕРС матеріалу.

4. За результатами експериментальних досліджень температурних та концентраційних залежностей питомого електроопору, коефіцієнта термо-ЕРС і розрахунку електронної структури створених термоелектричних матеріалів вперше встановлено механізми їхньої електропровідності. Показано, що за умови співпадіння знаків основних носіїв струму вихідного матеріалу та генерованих дефектів у створених матеріалах підвищується ефективність перетворення теплової енергії в електричну за рахунок збільшення значень питомої електропровідності. За відмінності основних типів носіїв струму вихідного матеріалу та генерованих дефектів *вперше* отримано нові термоелектричні матеріали електронного та діркового типів провідності, що дозволяє реалізувати на їхній основі термоелектроди обох знаків для термоелектричної термометрії.

5. Вперше спрогнозовано та підтверджено експериментально можливість створення нових термоелектричних матеріалів і концентраційні межі їхнього існування шляхом розрахунку ентальпії утворення ΔH_f та конфігураційної ентропії S_{cfg} як базових інтерметалідів ZrNiSn , HfNiSn , TiNiSn , VFeSb так і твердих розчинів на їхній основі.

6. Вперше встановлено квантовохімічну модель будови отриманих термоелектричних матеріалів як для ідеальної моделі структури, так і з урахуванням виявлених дефектів. Показано, що у даному класі термоелектричних матеріалів зона заборонених енергій утворюється у результаті розщеплення енергетичних рівнів *d*-електронів атомів двох перехідних металів і спричинена локалізацією електронної густини навколо більш електронегативного атома (Ni, Fe, Co, тощо). Отримані результати дозволили визначити підходи для створення нових термоелектричних матеріалів з покращеними функціональними характеристиками шляхом підбору легуючого компонента в залежності від симетрії і заповнення зовнішніх електронних оболонок атомів вихідного матеріалу.

7. Вперше показано, що створені термоелектричні матеріали (за винятком легованих «магнітними» РЗМ) характеризуються парамагнетизмом Паулі, в яких значення питомої магнітної сприйнятливості пропорційне густині електронних станів на рівні Фермі. Цей результат використано як додатковий незалежний параметр при оптимізації характеристик термоелектричного матеріалу.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

Достовірність наукових результатів отриманих в дисертаційній роботі Ромакою В.В. забезпечена:

- використанням перевірених методів синтезу матеріалів;
- комплексом методів структурних досліджень для характеристики отриманих матеріалів;
- застосуванням математичних методів обробки та аналізу масивів експериментальних даних;
- використанням низки методів моделювання та оптимізації електронної структури матеріалів в рамках теорії функціоналу густини;
- кореляцією результатів теоретичних розрахунків із експериментально встановленими властивостями матеріалів.

Наукове та практичне значення роботи.

Наукові положення дисертаційної роботи Ромаки В.В., висновки і рекомендації є істотним вкладом у розвиток фізико-хімічних основ створення нових термоелектричних матеріалів на основі інтерметалідів з покращеною ефективністю перетворення теплової енергії в електричну.

До практичного значення результатів дисертаційного дослідження належать:

- Створення нових термоелектричних матеріалів з покращеною ефективністю перетворення теплової енергії в електричну: $(\text{Zr}_{1-y}\text{Ni}_y)\text{Ni}_{1+x}\text{Sn}$, $\text{ZrNiSn}_{1-x}\text{Bi}_x$, $\text{Ti}_{1-x}\text{V}_x\text{NiSn}$, $\text{TiNi}_{1-x}\text{V}_x\text{Sn}$, $\text{V}_{1-x}\text{Ti}_x\text{FeSb}$, $\text{VFe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{Sb}$ та матеріалів для віток термопар обох знаків: $\text{Zr}_{1-x}\text{R}_x\text{NiSn}$ (R – РЗМ), $\text{Ti}_{1-x}\text{Dy}_x\text{NiSn}$, $\text{Ti}_{1-x}\text{V}_x\text{NiSn}$, $\text{TiNi}_{1-x}\text{V}_x\text{Sn}$. Перевагами отриманих матеріалів є простота їхнього синтезу, широкий температурний інтервал застосування, дешевизна та хімічна стійкість.

- Присокрення розроблення та зниження матеріальних затрат при створенні нових термоелектричних матеріалів з використанням запропонованих підходів до оптимізації їхніх функціональних характеристик методами квантово-хімічного моделювання.

Використання результатів роботи.

Основні результати наукових досліджень, отримані при виконанні дисертаційної роботи Ромаки В.В., використовувалися у ПАТ НВО “Термоприлад” (м. Львів) при проектуванні та розробленні конструкцій чутливих елементів термоперетворювачів на основі матеріалів HfNiSn, ZrNiSn та TiNiSn для низки прецизійних первинних перетворювачів температури та у ТзОВ «Проектно-конструкторське виробниче підприємство «КРЕДУВ» (м. Львів) при створенні первинних давачів температури в пристроях контролю та регулювання температури.

Особливої уваги заслуговують досліджені автором нові термометричні матеріали при створенні термоперетворювачів на основі TiNiSn, ZrNiSn, VFeSb та HfNiSn, частина з яких стабільно та надійно працюють за високих температур (до 1600 K) та володіють відтворюваними характеристиками при термоциклюванні, дії зовнішнього магнітного поля і високого рівня механічних вібрацій.

Використання запропонованих у дисертаційній роботі наукових та технічних рішень при створенні первинних засобів вимірювання температури, дає змогу у кілька разів підвищити їх точність та надійність.

Основні положення та результати дисертаційного дослідження Ромаки В.В. впроваджені у навчальний процес при викладанні матеріалознавчих дисциплін на кафедрі прикладного матеріалознавства та обробки матеріалів Національного університету “Львівська політехніка”.

Основні результати.

За результатами дисертаційної роботи Ромакою В.В. опубліковано в співавторстві: **2 монографії; 42 наукові статті** у українських та закордонних фахових виданнях, з яких **понад 30 статей у журналах, що входять до переліку наукометричних баз даних Scopus та Web of Science**; Отримані автором термоелектричні матеріали захищено **17 патентами** України.

Результати дисертації представлені та обговорені на численних профільних наукових конференціях як в Україні так і закордоном.

Оцінка мови та стилю дисертації.

Дисертація та автореферат написані грамотно, послідовно та логічно. Організація та стиль подачі матеріалів досліджень, наукових положень, висновків забезпечує доступність їх сприйняття. Структура і обсяг дисертаційної роботи відповідає вимогам МОН України, а автореферат дисертації в повній мірі відображає її зміст та основні наукові положення.

Відповідність змісту дисертації спеціальності.

Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, переліку використаних джерел, що налічує 496 найменувань та п’яти додатків (А-Д). Загальний обсяг дисертації становить 447 сторінок, з них 360 – основного тексту, що включає 243 рисунки та 15 таблиць.

Дисертаційна робота Ромаки В.В. відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство за такими напрямками досліджень:

- пошук принципів і шляхів створення нових прогресивних матеріалів;
- встановлення закономірностей зв'язку між показниками різних властивостей матеріалів.

У **вступі** автором висвітлена актуальність проблеми, визначені мета, завдання та методи дослідження, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами та планами. Сформульовано наукову новизну отриманих результатів та показано практичну цінність роботи, а також відомості про особистий внесок дисертанта, апробацію результатів роботи на наукових конференціях та семінарах, а також основні наукові праці, опубліковані за темою дисертації.

Перший розділ дисертації автор присвятив аналізу проблеми створення термоелектричних матеріалів. Чіткий і логічний виклад фізичних принципів оптимізації термоелектричних матеріалів дозволив дисертанту виділити визначальні параметри, зокрема термоелектричну добротність та коефіцієнт термоелектричної потужності, які визначають ефективність перетворення теплової енергії в електричну.

Дисертантом проведено порівняльний аналіз як традиційних термоелектричних матеріалів (халькогенідів та оксидів металів) так і сучасних (скутерудити, клатрати, фази зі структурою MgAgAs) та виділено їхні сильні та слабкі сторони. Серед розглянутих матеріалів автор виділив інтерметаліди зі структурою MgAgAs , які можуть бути використані в якості перспективних термоелектричних матеріалів. У розділі послідовно розглянуто структуру і властивості як базових інтерметалідів на основі Стануму та Стибію так і результати їхнього легування різноманітними домішками. Також представлено вплив режимів термічної обробки, відхилення у стехіометрії та наноструктурування на функціональні властивості даного класу термоелектричних матеріалів. Критичний огляд результатів легування цих матеріалів різними елементами показав, що вони характеризується відхиленням складу від стехіометричного та містять певні невстановлені структурні дефекти, які і визначають їхні термоелектричні властивості.

Для вирішення даної проблеми дисертантом запропоновано встановити взаємозв'язок результатів розрахунку електронної будови і фізичних властивостей матеріалу з моделлю його структури, що дозволить розвинути фізико-хімічні основи створення нових термоелектричних матеріалів на основі інтерметалідів з покращеними функціональними властивостями. Це визначило *мету та завдання проведеного дисертаційного дослідження*.

У **другому розділі** дисертантом детально описано використані в роботі методи досліджень. Варто зазначити, більша частина проведених експериментальних досліджень проводилися у провідних наукових лабораторіях Австрії, Франції, Польщі, України на сертифікованому обладнанні у співпраці із закордонними та вітчизняними вченими, що забезпечує достовірність отриманих результатів.

У **третьому розділі** дисертант представив кристалохімічну та квантовохімічну моделі для пояснення особливостей будови та властивостей термоелектричних матеріалів на основі інтерметалідів. Такий підхід дозволив автору створити теоретичну основу для вибору легувальних елементів при оптимізації термоелектричних характеристик досліджених матеріалів.

Кристалохімічний підхід пояснив геометрію будови інтерметалідів зі структурою MgAgAs та просторове розташування атомів у структурі, а також дозволив встановити утворення забороненої зони.

Квантовохімічна модель доповнила кристалохімічну і показала, що зона заборонених енергій у досліджених матеріалах утворюється за рахунок розщеплення зовнішніх енергетичних рівнів d -електронів атомів двох перехідних металів і спричинена локалізацією електронної густини навколо більш електронегативного атома (Ni, Fe, Co, тощо).

Таким чином, автор визначив підходи для створення нових термоелектричних матеріалів з покращеними функціональними характеристиками шляхом підбору легуючого компоненту у залежності від симетрії і заповнення зовнішніх електронних оболонок атомів вихідного матеріалу.

Четвертий розділ містить результати досліджень як термоелектричного матеріалу ZrNiSn так і твердих розчинів на його основі.

Новий підхід до моделювання структури ZrNiSn та застосування рентгеноструктурного аналізу на основі комбінованого рентгенівського випромінювання дозволив автору не лише встановити наявність структурних дефектів у ZrNiSn , але й використати отримані результати при розробці способу оптимізації структури матеріалу.

Поряд із розрахунками електронного спектру, дисертантом здійснено термодинамічні розрахунки для вивлення розчинності четвертого компоненту у ZrNiSn . Використовуючи інформацію про енергетичні параметри базового матеріалу ZrNiSn , зокрема положення рівня Фермі, було проведено його легування як додатковими атомами Ni, так і атомами рідкісноземельних металів, In, Sb та Bi.

На основі проведених досліджень, дисертанту вдалося запропонувати спосіб оптимізації структури, який він в подальшому активно використовував для аналізу решти матеріалів. Це дозволило встановити природу дефектів ZrNiSn і твердих розчинів на його основі, шляхи їх виникнення та ліквідації при легуванні та механізми їхньої електропровідності.

У **п'ятому розділі** дисертантом розглянуто структуру та властивості термоелектричного матеріалу HfNiSn та вплив на них в результаті легування атомами Lu, Co, Rh, Ru та Sb.

Використання дисертантом мікроструктурних та рентгеноструктурних досліджень у поєднанні із способом оптимізації структури дозволили показати, що причиною електронного типу провідності напівпровідникового термоелектричного матеріалу HfNiSn є виникнення дефектів донорної природи внаслідок утворення статистичної суміші атомів Ni та Hf у позиції атомів Hf. Отриманий результат узгоджується із результатами електрофізичних досліджень, які встановили, що основними носіями струму у матеріалі є електрони, а електропровідність здійснюється за стрибковим механізмом по локалізованих станах домішкової донорної зони. За вищих температур відбувається активація електронів з домішкового донорного рівня в зону провідності.

Суттєве зростання ефективності перетворення теплової енергії в електричну досягнуто при легуванні HfNiSn Sb, які по відношенню до Sn проявляють

донорну природу. Таке легування супроводжується впорядкуванням структури вихідного матеріалу та прогнозованим рухом рівня Фермі у глиб зони провідності. Це дозволило автору створити новий термоелектричний матеріал $\text{HfNiSn}_{1-x}\text{Sb}_x$, у якого значення коефіцієнта термоелектричної потужності зростає з $Z^* = 9 \text{ мкВт}^{-2}\text{см}^{-1}$ для HfNiSn до $Z^* = 24 \text{ мкВт}^{-2}\text{см}^{-1}$ для легovanого матеріалу.

Шостий розділ дисертації Ромаки В.В. присвячений дослідженню структури і властивостей TiNiSn , при легуванні атомами РЗМ, V та Co.

За допомогою способу оптимізації структури автором встановлено, що природа структурних дефектів у TiNiSn є аналогічною до ZrNiSn та HfNiSn . Дослідження системи Ti-Ni-Sn дозволили не лише виявити додаткову фазу, але й встановити фазові рівноваги у системі за вищих температур.

Показано, що легування TiNiSn атомами рідкісноземельних металів приводить до зміни типу провідності, а механізм є аналогічним до $\text{Zr}_{1-x}\text{R}_x\text{NiSn}$ та $\text{Hf}_{1-x}\text{Lu}_x\text{NiSn}$.

У **сьомому розділі** дисертаційної роботи здійснено опис структури та властивостей термоелектричних матеріалів VFeSb та ZrCoSb , а також твердих розчинів на основі VFeSb .

Характеристику термоелектричного матеріалу VFeSb дисертант розпочав із дослідження системи V-Fe-Sb за різних температур. В результаті проведених досліджень показано, що зміна структури сплаву еквіатомного складу пов'язана із розширенням області гомогенності бінарної фази зі структурою Ni_2In . Саме ця особливість, на думку автора, обмежує використання даного термоелектричного матеріалу за високих температур. Використання способу оптимізації структури дозволили показати, що природа структурних дефектів у VFeSb пов'язана з виникненням вакансій у кристалографічній позиції атомів Sb, що і визначило електронний тип провідності та його механізм.

Дослідження термоелектричного матеріалу ZrCoSb дозволило автору виявити, що його склад задається формулою $\text{Zr}_{1+x}\text{Co}_{1-x}\text{Sb}$. Це дозволяє, керуючи, змінювати не лише хімічний склад матеріалу, але й його термоелектричні властивості. Причиною існування області гомогенності є зростання числа вакансій (поява донорних дефектів) та заміщення частини атомів Co додатковими атомами Zr (поява акцепторних дефектів). Доказом того, що матеріал є сильно компенсованим (одночасно містить значну кількість іонізованих акцепторів та донорів) є наявність максимуму на залежності зміни питомого електроопору. Такий механізм дефектоутворення, на думку автора, дозволить отримати термоелектричні матеріали з наперед заданими характеристиками як для перетворення теплової енергії в електричну, так і для вимірювання температури.

З огляду на значний обсяг проведених експериментальних та теоретичних досліджень, їхній аналіз та узагальнення, до представленої дисертаційної роботи виникли наступні **зауваження**:

1. залишається не зрозумілим, яким чином впливають на структуру і властивості досліджених термоелектричних матеріалів режими вирощування та термічного оброблення (тривалість та температура відпалу) та як ці режими врахувались при моделюванні електронної структури матеріалів;

2. автор приділяє велику увагу дослідженню взаємозв'язку електронної структури і фізичних властивостей розроблених матеріалів, але мікроструктура та її вплив на властивості термоелектричних матеріалів досліджені не достатньо. Наприклад, мікроструктури наведені на рис. 5.7 не є інформативними тому, що для доказу двофазної структури сплаву $\text{Hf}_{1-x}\text{Lu}_x\text{NiSn}$, що містить $x(\text{Lu}) = 0,5$, необхідно привести дані електронографічних досліджень;

3. термоелектричні та термометричні матеріали для створення термоперетворювачів, повинні стабільно працювати при високих температурах, термоциклованні, дії зовнішнього магнітного поля, високого рівня механічних вібрацій, але вплив цих факторів на експлуатаційні властивості розроблених матеріалів в роботі не досліджено;

4. структура термоелектричних матеріалів на основі Sb (VFeSb) зберігається до температури 870K, однак автор не вказує, як на граничну температуру впливає легування Ti;

5. на температурних залежностях питомого електроопору та термо-ЕДС відсутні межі похибок;

6. на жаль, процедури дослідно-промислового випробування використання дослідних матеріалів в термоперетворювачах в роботі не описані, розрахунок очікуваної економічної ефективності не наведено;

7. у тексті дисертації зустрічаються граматичні помилки та описки.

Наведені критичні зауваження є частковими і не впливають на загальне позитивне враження від дисертації Ромаки Віталія Володимировича, яка являє собою цілісне та завершене наукове дослідження, яке має фундаментальний і прикладний характер. Своїми науковими і практичними здобутками дисертант зробив значний внесок у теорію та практику підвищення ефективності перетворення теплової енергії в електричну в термоелектричних матеріалах, що виявляється у розвитку фізико-хімічних основ створення нових термоелектричних матеріалів на основі інтерметалідів зі структурою MgAgAs з покращеними функціональними властивостями шляхом підбору легуючого компоненту в залежності від його електронної будови.

За своєю актуальністю, новизною і достовірністю отриманих результатів дисертаційна робота Ромаки В.В. відповідає вимогам п.19 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань» ДАК МОН України до докторських дисертацій, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри матеріалознавства
ім. Ю.М. Тарана
д.т.н., проф.

Підпи с проф. Куцової В.З. засвідчую

Вчений секретар НМетА
проф.



Куцова В.З.

Потап О.Ю.