



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з наукової роботи  
Національного університету  
«Львівська політехніка»  
д.т.н., доц. Демидов І.В.  
06 2022 р.

### ВИТЯГ

з протоколу № 8-22 фахового семінару кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного університету «Львівська політехніка» від 9 червня 2022 р.

1. ПРИСУТНІ: 8 із 10 науково-педагогічних працівників, а саме:

1. Дурягіна Зоя Антонівна, завідувачка кафедри, д.т.н., проф.
2. Кулик Володимир Володимирович, доцент кафедри, д.т.н., доц.
3. Плешаков Едуар Іванович, доцент кафедри, к.т.н., доц.
4. Богун Лідія Ігорівна, доцент кафедри, к.т.н., доц.
5. Тепла Тетяна Леонідівна, доцент кафедри, к.т.н., доц.
6. Лютій Павло Ярославович, ст. викладач кафедри, к.х.н.
7. Кушнір Василь Іванович, ст. викладач кафедри.
8. Ковбасюк Тарас Михайлович, асистент кафедри, к.т.н.

На фаховому семінарі присутні аспіранти:

1. Філімонов Олексій Сергійович
2. Ваврух Валентина Іванівна

На фаховий семінар запрошені:

1. Ланець Олексій Степанович, директор Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., проф.
2. Завалій Ігор Юліанович, завідувач відділу водневих технологій та матеріалів альтернативної енергетики Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, член кореспондент НАН України, д.х.н., проф.
3. Андрущак Анатолій Степанович, завідувач кафедри прикладної фізики та наноматеріалознавства Навчально-наукового інституту прикладної математики та фундаментальних наук Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., проф.
4. Похмурська Ганна Василівна, професорка кафедри нафтогазової інженерії та зварювання Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., ст.н.с.
5. Клим Галина Іванівна, професорка кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Навчально-наукового інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., проф.
6. Погрелюк Ірина Миколаївна, завідувачка відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, д.т.н., проф.
7. Кречковська Галина Василівна, провідний науковий співробітник відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України,

- д.т.н., старший дослідник.
8. Зінь Іван Миколайович, провідний науковий співробітник відділу корозії та протикорозійного захисту Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, д.т.н., с.н.с.
  9. Ізонін Іван Вікторович, доцент кафедри систем штучного інтелекту Навчально-наукового інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», к.т.н., доц.
  10. Василів Богдан Дмитрович, старший науковий співробітник відділу водневих технологій та матеріалів альтернативної енергетики Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, к.т.н., с.н.с.
  11. Вербовецький Юрій Володимирович, старший науковий співробітник відділу водневих технологій та матеріалів альтернативної енергетики Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, к.х.н., с.н.с.

З присутніх – 10 докторів наук та 6 кандидатів наук – фахівці за профілем представленої дисертації.

Голова засідання – д.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів Кулик Володимир Володимирович.

- 2. СЛУХАЛИ:** Доповідь докторанта кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів Тростянчина Андрія Миколайовича за матеріалами дисертації: «Концепція застосування водневої обробки для удосконалення структурно-фазового стану та властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних та перехідних металів», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 *Матеріалознавство*.

Науковий консультант д.т.н., проф. Дурягіна Зоя Антонівна.

Тему дисертації затверджено “27” жовтня 2020 р. на засіданні Вченої ради Національного університету «Львівська політехніка», протокол № 66.

Робота виконана на кафедрі матеріалознавства та інженерії матеріалів Національного університету «Львівська політехніка» та у відділі водневих технологій та матеріалів альтернативної енергетики Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

По доповіді було задано 32 запитання, на які доповідач дав переконливі та ґрунтовні відповіді. Питання задавали:

- завідувач відділу водневих технологій та матеріалів альтернативної енергетики Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, член кореспондент НАН України, д.х.н., проф. Завалій Ігор Юліанович.
- провідний науковий співробітник відділу корозії та протикорозійного захисту Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, д.т.н., с.н.с. Зінь Іван Миколайович.
- завідувачка відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, д.т.н., проф. Погрелюк Ірина Миколаївна.
- провідний науковий співробітник відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН

України, д.т.н., старший дослідник Кречковська Галина Василівна.

- професорка кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., проф. Клим Галина Іванівна.
- завідувач кафедри прикладної фізики та наноматеріалознавства Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., проф. Андрушак Анатолій Степанович.
- професорка кафедри нафтогазової інженерії та зварювання Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., ст.н.с. Похмурська Ганна Василівна.
- доцент кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., доц. Кулик Володимир Володимирович.
- доцент кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів Національного університету «Львівська політехніка», к.т.н., доц. Тепла Тетяна Леонідівна.
- доцент кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів Національного університету «Львівська політехніка», к.т.н., доц. Богун Лідія Ігорівна.

### 3. Виступи присутніх.

З оцінкою дисертації Тростянчина А.М. виступили рецензенти:

- завідувач кафедри прикладної фізики та наноматеріалознавства Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., проф. Андрушак Анатолій Степанович.
- професорка кафедри нафтогазової інженерії та зварювання Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., ст.н.с. Похмурська Ганна Василівна.
- професорка кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., проф. Клим Галина Іванівна.

які зазначили, що дисертаційна робота характеризується єдністю змісту, має встановлену вимогами структуру: анотацію, вступ, сім розділів, висновки, список використаних джерел, додатки; містить наукові положення, що мають наукову новизну, істотне практичне значення в галузі водневого матеріалознавства, а зміст роботи відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 *Матеріалознавство*. Також було вказано на доцільність внесення низки поправок композиційного, редакційно-стилістичного, технічного та граматичного характеру для поліпшення представлення поданого матеріалу, а також повної відповідності рукопису дисертації вимогам МОН України стосовно її оформлення. При перевірці дисертації на академічний плагіат запозичень без посилання на відповідне джерело не виявлено.

З оцінкою дисертаційної роботи також виступили присутні на фаховому семінарі: завідувач відділу Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, член кореспондент НАН України, д.х.н., проф. Завалій І.Ю., провідний науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, д.т.н., с.н.с. Зінь І.М., завідувачка відділу Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, д.т.н., проф. Погрелюк Ірина Миколаївна, провідний науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, д.т.н., старший дослідник Кречковська Галина Василівна, завідувачка кафедри Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н. проф. Дурягіна З.А., доцент Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., доц. Кулик В.В., доцент Національного університету «Львівська політехніка», к.т.н., доц. Ізонін І.В., старший науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, к.х.н., с.н.с. Вербовацький Ю.В. Виступаючі дали позитивну оцінку дисертаційній роботі, відмітили актуальність роботи, вагомий особистий внесок здобувача в експериментальні дослідження та інтерпретацію отриманих результатів, аргументованість висновків,

наукової новизни та практичної цінності роботи, а також зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, які виконувались у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України та Національному університеті «Львівська політехніка» МОН України у межах бюджетних тем згідно з тематичними планами НАН України, цільової комплексної програми фундаментальних наукових досліджень НАН України «Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях», гранту для молодих учених НАН України, а також кафедральної науково-дослідної роботи згідно з тематичними планами МОН України.

Зважаючи на висловлене, можна зробити висновок про те, що обговорювана дисертація є самостійним завершеним науковим дослідженням, у якому отримані нові обґрунтовані результати. Дисертація на тему: «Концепція застосування водневої обробки для удосконалення структурно-фазового стану та властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних та перехідних металів» підготовлена за спеціальністю 05.02.01 *Матеріалознавство*, відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 *Матеріалознавство* (Перелік наукових спеціальностей, затверджений Наказом Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України 14 вересня 2011 року № 1057), та вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, п. 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197 і може бути рекомендована до захисту у спеціалізованій вченій раді.

З характеристикою наукової зрілості здобувача виступила наукова консультантка д.т.н., проф. Дурягіна З.А., яка відзначила, що Тростянчин А.М. після завершення у 1999 р. Державного університету «Львівська політехніка» за спеціальністю прикладне матеріалознавство впродовж 15 років працював у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, пройшовши шлях від інженера до старшого наукового співробітника. З 2012 р. розпочав педагогічну діяльність, працюючи за сумісництвом асистентом кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів Національного університету «Львівська політехніка», а з 2014 р. працює на кафедрі за основним місцем праці, на даний час на посаді доцента. Після захисту кандидатської дисертаційної роботи опублікував значну кількість друкованих праць (не лише за темою докторської дисертації), включаючи статті в наукових фахових виданнях України та інших держав, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science, патенти України на винахід, колективні монографії, навчальний посібник, тези доповідей, методичні роботи, має доволі високий індекс Гірша (*h-index*: 9). За цикл публікацій з водневої тематики був удостоєний премії Президента України для молодих вчених (2004 р.). За час підготовки в докторантурі проявив високу професійну підготовку та наполегливість у вирішенні науково-технічних проблем, повністю виконав індивідуальний план наукової роботи.

Тростянчин А.М. є повністю сформованим науковцем, який здатен на високому професійному рівні виконувати наукові дослідження та заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 *Матеріалознавство*.

**4. Заслухавши та обговоривши доповідь Тростянчина Андрія Миколайовича, а також за результатами попередньої експертизи представленої дисертації на фаховому семінарі кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів, прийнято наступні висновки щодо дисертації «Концепція застосування водневої обробки для удосконалення структурно-фазового стану та властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних та перехідних металів»:**

## Висновок

### фахового семінару про наукову та практичну цінність дисертації «Концепція застосування водневої обробки для удосконалення структурно-фазового стану та властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних та перехідних металів» здобувача наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 *Матеріалознавство*

- 4.1. Актуальність теми дисертації Тростянчина Андрія Миколайовича.** Застосування водню як технологічного середовища у процесах обробки функціональних матеріалів дозволяє цілеспрямовано змінювати їх фазовий склад та структуру, відкриваючи перспективи удосконалення експлуатаційних властивостей. Розроблені водневі технології ґрунтуються на закономірностях його впливу на фазові перетворення в досліджуваних матеріалах. Раніше функціональні матеріали обробляли в атмосфері водню за високих температур лише для очищення їх від домішок. Однак розробка нового класу функціональних матеріалів на основі рідкісноземельних металів (РЗМ), вироби з яких отримують в основному методами порошкової металургії, сприяла застосуванню водню як під час подрібнення (внаслідок гідридного окрихчення), так і для зміни їх фазового стану та структури. Літературні дані свідчать про позитивний вплив водневої обробки методом гідрування, диспропорціонування, десорбції, рекомбінації (ГДДР) на фазово-структурний стан інтерметалічних сполук, включаючи їх гомогенізацію та здрібнення до нанорозмірів. У зв'язку з цим актуальним завданням є детальне дослідження впливу параметрів водневої обробки (тиск водню, температура та тривалість взаємодії) на зміну мікроструктури та фазового складу з метою встановлення регулятивного механізму застосування водню для обробки різних типів РЗМ-вмісних матеріалів. У роботі встановлено закономірності взаємодії з воднем гідридних матеріалів на основі сполуки  $\text{LaNi}_5$ , які є надзвичайно перспективними з точки зору компактного зберігання водню в зв'язаному стані, а також феромагнітних сплавів на основі сплавів систем  $\text{Sm-Co}$  та  $\text{Nd-Fe-B}$ , які володіють найвищими магнітними властивостями серед усіх відомих матеріалів і є незамінними в застосуваннях від автомобілебудування до аерокосмічної галузі. Для скорочення трудомісткості та тривалості експериментальних досліджень дороговартісних та дефіцитних сплавів РЗМ показано можливість застосування методів комп'ютерного моделювання для прогнозування їх фазового складу, мікроструктури та експлуатаційних властивостей за попередньо встановленими технологічними режимами.
- 4.2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри.** Тема дисертації відповідає науковому напряму кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів: «Створення нових матеріалів, покращення їх функціональних властивостей та використання методів інженерії поверхні для регулювання процесів структуроутворення матеріалів». Дисертація виконана в межах науково-дослідних робіт, що реалізовувались у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України та Національному університеті «Львівська політехніка» МОН України у межах бюджетних тем згідно з тематичними планами НАН України: НД - 27/243 «Розробка технології магнітної і ультразвукової обробки у водні сплавів РЗМ для підвищення якості сталей магнітів і металогідридних електродів» (номер держреєстрації 0102U002672, 2002–2004 рр.); НД - 27/261 «Розробка нових гідридних матеріалів з керованою структурою та фізико-хімічними властивостями для створення ефективних акумуляторів водню та постійних магнітів на основі РЗМ, Zr, Ti та Mg» (номер держреєстрації 0103U00353, 2003-2005 рр.); НД-27/319 «Розробка водневої технології формування субмікронної структури у феромагнітних сплавах системи самарій–кобальт із застосуванням

магнітної і ультразвукової обробки» (номер державної реєстрації 0105U004317, 2005-2006 рр.); НД-27/365 «Розробка методів формування дрібнодисперсної структури у порошках феромагнітних сплавів на основі  $\text{SmCo}_5$ » (номер держреєстрації 0107U004065, 2007-2011 рр.); НД 27-4.5 «Застосування водневих технологій для отримання порошків феромагнітних матеріалів з вузьким розподілом розмірів частинок» (номер держреєстрації 0109U006735, 2009-2010 рр.); НД 27-2.49 «Розроблення нових методів синтезу та водневих технологій для поліпшення структури і властивостей функціональних матеріалів на основі рідкісноземельних і d-перехідних металів» (номер держреєстрації 0112U002774; 2012-2016 рр.); у межах цільової комплексної програми фундаментальних наукових досліджень НАН України «Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях»: «Розроблення водневих технологій здрібнювання мікроструктури феромагнітних сплавів на основі  $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$  для підвищення властивостей сталей магнітів» (номери держреєстрації 0111U004606, 0112U002794, 0113U000758, 2011-2014 рр.); за грантом для молодих учених НАН України: «Вдосконалення технології синтезу нових воденьсорбуючих та магнітних матеріалів на основі магнію, цирконію та РЗМ» (0109U004977, 2009-2010 рр.); у межах кафедральної науково-дослідної роботи згідно з тематичними планами МОН України: «Моделювання та синтезування нових багатокомпонентних функціональних матеріалів з прогнозованою структурою та властивостями» (0116U004142, 2016-2018 рр.), у яких автор брав участь як керівник (0109U004977), відповідальний виконавець (0107U004065, 0109U006735, 0111U004606, 0112U002794, 0113U000758) та виконавець (решта).

- 4.3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів.** Усі результати, що стосуються основного змісту дисертаційної роботи і виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Структура роботи та узагальнення отриманих результатів обговорювалися спільно з науковим консультантом. Планування та виконання експериментальних досліджень впливу параметрів водневої обробки на фазовий склад, структуру та властивості досліджуваних матеріалів, які виконувались в Фізико-механічному інституті ім. Г.В.Карпенка НАН України, здійснювались під керівництвом д.т.н., с.н.с. Булика Ігоря Івановича. Здобувач брав безпосередню участь у проектуванні та запуску в експлуатацію дослідницького обладнання, синтезуванні досліджуваних сплавів, проведенні оброблення в середовищі водню за різними режимами та параметрами, оформленні та аналізі результатів диференційного термічного аналізу (ДТА), рентгенівського фазового аналізу (РФА), сканувальної електронної мікроскопії (SEM), пресуванні порошків у магнітному полі та їх спіканні методом солід ГДДР. Частина досліджень виконана за допомоги к.т.н. Боруха Ігоря Володимировича (сплави на основі сполуки  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$  леговані Zr), к.х.н. Лютого Павла Ярославовича (сплави на основі сполуки  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ) та к.т.н., доц. Ізоніна Івана Вікторовича (комп'ютерне моделювання з використанням методів машинного навчання).
- 4.4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій** підтверджується значним обсягом експериментальних досліджень, отриманих з використанням сучасного науково-дослідного обладнання, та забезпечується використанням фундаментальних положень теорії водневої обробки матеріалів, а також зіставленням отриманих результатів з даними інших дослідників. Інтерпретація результатів досліджень узгоджується з існуючими теоретичними розробками в галузі гідридного матеріалознавства. Отримані результати апробовані на авторитетних міжнародних вітчизняних та закордонних конференціях.
- 4.5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру.**

Вперше:

- Запропоновано концепцію водневої обробки, що полягає у встановленні регулятивного механізму цілеспрямованої зміни мікроструктури, фазового складу і технологічних параметрів для забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей функціональних матеріалів на основі рідкісноземельних та перехідних металів.
- Встановлено, що необхідною умовою для максимального текстурування сплавів на основі рідкісноземельних металів внаслідок водневої обробки є присутність фрагментів вихідної фази серед продуктів її диспропорціонування.
- Показано можливість повного диспропорціонування високостабільної фази  $\text{SmCo}_5$  за низьких тисків водню і встановлено, що для завершення цієї реакції достатньо тисків водню 0,4-0,5 МПа та витримки впродовж 2-5 год за температури 640 °С.
- Виявлено, що диспропорціонування феромагнітних сплавів на основі РЗМ розпочинається з границь зерен та поширюється до їх центру, що супроводжується формуванням навколо зерен своєрідної області, яка складається з сітки суміші продуктів диспропорціонування, в комірках якої розташовуються залишки недиспропорціонованої фази.
- Встановлено, що комплексне легування Zr і Fe сплавів на основі сполуки  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , з одного боку, дозволяє забезпечити присутність залишків феромагнітної фази серед продуктів диспропорціонування, а з іншого, – отримати після рекомбінування мікроструктуру з розміром зерен 100...215 нм.

Набули подальшого розвитку:

- Наукові основи способу формування високодисперсної анізотропної структури у функціональних матеріалах на основі РЗМ внаслідок обробки в середовищі водню. Зокрема, встановлено, що тиск водню під час помелу промислового феромагнітного сплаву КС37 має вирішальний вплив на фазовий склад отримуваних порошків, а тривалість помелу відіграє ключову роль у формуванні кристалографічної текстури. Показано, що внаслідок водневої обробки РЗМ-вмісних магнітних матеріалів можливе формування високодисперсної структури, що супроводжується виникненням обмінної взаємодії навіть у випадках, коли розміри структурних складових перевищують верхню межу наномасштабу.
- Ансамблеві методи обчислювального інтелекту на основі агрегування слабких учнів (дерев рішень), що в цілому забезпечило підвищення вірогідності прогнозування магнітних властивостей феромагнітних матеріалів на основі сплавів РЗМ на 12-15%.

#### 4.6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України та інших держав, які входять до міжнародних наукометричних баз:

1. Bulyk I.I., Trostianchyn A.M., Synyushko V.G., Trostianchyn I.V., Davydov V.M. Phase transformations in  $\text{LaNi}_{5-x}\text{Co}_x\text{-H}_2$  system. *Intermetallics*. 2005. Vol.13, No 11. P. 1220-1224. (Q1, Scopus та Web of Science).
2. Bulyk I.I., Trostyanchyn A.M., Markovych V.I. Hydrogen-induced phase transformations in alloys based on  $\text{SmCo}_5$  under pressures of up to 650 kPa. *Materials Science*. 2007. Vol. 43, No 1. P. 102-108. (Q3, Scopus).
3. Bulyk I.I., Markovych V.I., Trostyanchyn A.M., Chervatyuk V.A. Hydrogen-induced phase transformations in Sm-Co alloy under the action of ultrasound. *Materials Science*. 2007. Vol. 43, No 5. P. 675-681. (Q3, Scopus).
4. Trostianchyn A.M., Bulyk I.I., Trostianchyn I.V., Mudry S.I. Phase transformations in the  $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Ni}_{3.5}\text{Al}_{1.5}\text{-H}_2$  ( $x = 0.1$  and  $0.2$ ) system. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2008. Vol. 354, No 35-39. P. 4418-4422. (Q2, Scopus).
5. Bulyk I.I., Markovych V.I., Trostyanchyn A.M. Specific features of solid HDDR in

- alloys based on  $\text{SmCo}_5$  in low-pressure hydrogen. *Materials Science*. 2008. Vol. 44, No 4. P. 602-607. (Q3, Scopus).
6. Trostianchyn A.M., Bulyk I.I., Trostianchyn I.V., Mudryi S.I., Davydov V.M. Phase transformations in  $\text{La}_{0.5}\text{Nd}_{0.5}\text{Ni}_{5-x}\text{Al}_x\text{-H}_2$  system. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2010. Vol. 23, No 2. P. 119-125. (Q2, Scopus).
  7. Bulyk I.I., Lyutyi P.Ya., Trostianchyn A.M. Phase transformations in  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  compound initiated by hydrogen under 4 MPa pressure. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2011. Vol. 33, No 6. P. 807-818. (Q3, Scopus та Web of Science).
  8. Bulyk I.I., Trostyanchyn A.M., Lyutyi P.Ya. Influence of the time of interaction of an alloy based on  $\text{SmCo}_5$  with low-pressure hydrogen on the phase composition. *Materials Science*. 2012. Vol. 48, No 3. P. 316-322. (Q3, Scopus).
  9. Bulyk I.I., Trostyanchyn A.M., Lyutyi P.Y. Effect of grinding in hydrogen and vacuum treatment on the phase composition of  $\text{SmCo}_5$  alloy. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2013. Vol. 52, No 7-8. P. 370-379. (Q3, Scopus).
  10. Bulyk I.I., Trostianchyn A.M., Burkhovetskyi V.V., Tarenkov V.Yu. Peculiarities of the HDDR processes at low hydrogen pressures in Nd-Fe-B system alloys. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2014. Vol. 36, No 7. P. 903-916. (Q3, Scopus).
  11. Bulyk I.I., Trostyanchyn A.M., Lyutyi P.Ya., Burkhovetskyi V.V. Interaction between hydrogen and ground  $\text{SmCo}_5$  alloy. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014. Vol. 52, No 9-10. P. 530-538. (Q3, Scopus).
  12. Bulyk I.I., Trostyanchyn A.M., Burkhovets'kyi V.V., Borukh I.V., Duryahina Z.A., Lemishka I.A. Dependence of the phase composition of  $\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{73.9}\text{Zr}_{2.1}\text{B}_8$  alloy on the conditions of milling in hydrogen. *Materials Science*. 2015. Vol. 50, No 4. P. 593-599. (Q3, Scopus).
  13. Bulyk I.I., Burkhovetskyi V.V., Trostianchyn A.M. Change of the phase-structural state of  $\text{SmCo}_5$ -based alloy during solid-HDDR under low hydrogen pressure. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2015. Vol. 37, No 2. P. 169-184. (Q3, Scopus).
  14. Bulyk I.I., Trostianchyn A.M. The dependence of phase composition of previously disproportionated  $\text{SmCo}_5$ -based alloy on temperature and duration of recombination. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2016. Vol. 38, No 4. P. 509-517. (Q3, Scopus).
  15. Trostianchyn A., Bulyk I., Duriagina Z. The influence of iron content on the phase-structural state of the alloy based on  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  compound during hydrogen-vacuum treatment. *Functional Materials*. 2021. Vol. 28, No 3. P. 497-504. (Q4, Scopus).
  16. Trostianchyn A., Duriagina Z., Izonin I., Tkachenko R., Kulyk V., Pavliuk O. Sm-Co alloys coercivity prediction using stacking heterogeneous ensemble model. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2021. Vol. 27, No 4. P. 195-202. (Q3, Scopus).
  17. Trostianchyn A., Duriagina Z., Izonin I., Tkachenko R., Kulyk V., Lotoshynska N. An approach toward prediction of Sm-Co alloy's maximum energy product using feature bagging technique. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2022. Vol. 28, No 2. P. 91-96. (Q3, Scopus).

*Патенти України на винахід:*

18. Булик І.І., Панасюк В.В., Тросянчин А.М. Спосіб формування анізотропної дрібнозеренної структури порошків сплавів системи Sm-Co воднево-вакуумним термічним обробленням: пат. 96810 Україна. МПК H01 F 1/053; H 01 F 1/055; B 82 B 3/00; заявл. 11.01.2010. Опубл. 12.12.2011, Бюл. №23.
19. Булик І.І., Панасюк В.В., Тросянчин А.М. Спосіб формування анізотропної дрібнозеренної структури порошків сплавів системи Sm-Co помелом їх у водні: пат. 96811 Україна. МПК H 01 F 1/053; H 01 F 1/055; B 82 B 3/00; заявл. 11.01.2010. Опубл. 12.12.2011, Бюл. №23.
20. Булик І.І., Тросянчин А.М., Дмитришин В.М., Лютий П.Я. Спосіб гідрування, десорбування, рекомбінування (ГДДР) під низьким тиском водню для



- формування анізотропної дрібнозеренної структури порошків сплавів системи Sm-Co та отримання порошків з такою структурою: пат. 102899 Україна. МПК Н 01 F 7/00, Н 01 F 7/02, В 22 F 9/00, В 22 F 9/04; заявл. 14.11.2011. Опубл. 27.08.2013, Бюл. №16.
21. Булик І.І., Тростянчин А.М., Лютий П.Я., Бурховецький В.В. Спосіб формування анізотропної дрібнозеренної мікроструктури у порошках сплавів системи Nd-Fe-B: пат. 106651 Україна. МПК Н 01 F 1/057, Н 01 F 1/00, Н 01 F 41/00, В 22 F 9/00, В 22 F 9/04; заявл. 04.10.2012. Опубл. 25.09.2014, Бюл. №18.
  22. Булик І.І., Тростянчин А.М., Борух І.В., Бурховецький В.В. Спосіб спікання порошків сплавів системи Nd-Fe-B: пат. 116890 Україна. МПК В22F 3/10, В22F 9/16, H01F 1/055 В22F 9/00, H01F 1/057, H01F 7/02; заявл. 16.02.2015. Опубл. 25.05.2018, Бюл. №10.
- Матеріали та тези конференцій:*
23. Bulyk I.I., Markovych V.I., Trostyanchyn A.M. Interaction of the alloy based on SmCo<sub>5</sub> compound with hydrogen at pressures 0.1-0.66 MPa. *IX International Conference Hydrogen Materials Science & Chemistry of Carbon Nanomaterials (ICHMS'2005)*. September 5-11, 2005, Sevastopol – Crimea, Ukraine, 2005. P. 264-265.
  24. Тростянчин А.М., Булик І.І., Тростянчин І.В., Мудрий С.І. Фазові перетворення у системі La<sub>0.5</sub>Nd<sub>0.5</sub>Ni<sub>5-x</sub>Al<sub>x</sub>-H<sub>2</sub>. *Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи: Матеріали XIX Відкритої науково-технічної конференції КМН-2005, Львів, 2005. С.184-187.*
  25. Тростянчин А.М., Булик І.І., Тростянчин І.В., Мудрий С.І., Давидов В.М. Фазові перетворення у системі La<sub>1-x</sub>Nd<sub>x</sub>Ni<sub>3.5</sub>Al<sub>1.5</sub>-H<sub>2</sub>. *Hydrogen economy and hydrogen treatment of materials: Proc. of Fifth Int. Conf. "HTM-2007"*, May 21-25, 2007, Donetsk, 2007. P.586-590.
  26. Маркович В., Булик І., Тростянчин А. Проблемні аспекти взаємодії промислових сплавів Sm-Co з воднем при низьких тисках. *Наукова конференція «Львівські хімічні читання»: Збірник наукових праць XI Наукової конференції «Львівські хімічні читання – 2007»*. 30 травня – 1 червня 2007, Львів, 2007. У18.
  27. Trostianchyn A.M., Bulyk I.I., Trostianchyn I.V., Mudry S.I. Phase transformations in the La<sub>1-x</sub>Nd<sub>x</sub>Ni<sub>3.5</sub>Al<sub>1.5</sub>-H (x=0.1 and 0.2) system. *International Workshop on Functional and Nanostructured Materials: Proc. 5<sup>th</sup> International Workshop on Functional and Nanostructured Materials (FNMA-2008)*. 31 August – 6 September, 2008, Lviv, 2008. P. 54.
  28. Лютий П., Тростянчин А., Булик І. Ініційовані воднем фазові перетворення у системі Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>-H<sub>2</sub>. *Наукова конференція «Львівські хімічні читання»: Збірник наукових праць XII Наукової конференції «Львівські хімічні читання – 2009»*. 1 – 4 червня 2009, Львів, 2009. Н34.
  29. Bulyk I.I., Lyutyu P.Ya., Trostianchyn A.M. Phase transitions in the Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>-H<sub>2</sub> system under hydrogen pressure between 5 and 40 atm. *International conference on crystal chemistry of intermetallic compounds: Proc. 11<sup>th</sup> International conference on crystal chemistry of intermetallic compounds (IMC-XI)*. May 30 – June 2, 2010, Lviv, 2010. P.71.
  30. Дмитришин В., Лютий П., Тростянчин А., Булик І. Ініційовані воднем фазові перетворення у порошках системи SmCo<sub>5</sub>-H<sub>2</sub>. *Наукова конференція «Львівські хімічні читання»: Збірник наукових праць XIII Наукової конференції «Львівські хімічні читання – 2011»*. 29 травня – 1 червня 2011, Львів, 2011. Н23.
  31. Bulyk I.I., Trostianchyn A.M., Lyutyu P.Ya., Dmytryshyn V.M. Phase transitions in SmCo<sub>5</sub>-based alloy during mechanochemical under hydrogen and vacuum treatment. *International Materials Science Conference HighMatTech: Proc. 3<sup>rd</sup> International Materials Science Conference HighMatTech-2011*. October 3-7, 2011, Kiev, 2011. P. 259.

32. Дмитришин В.М., Булик І.І., Лютий П.Я., Тростянчин А.М. Зміна мікроструктури сплаву КС37 під час механохімічного та термічного оброблення у водні. *Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи*: Матеріали XXII Відкритої науково-технічної конференції КМН-2011. 26-28 жовтня 2011, Львів, 2011. С. 146-147.
  33. Булик І.І., Бурховецький В.В., Варюхін В.М., Таренков В.Ю., Тростянчин А.М., Лютий П.Я. Вплив умов солід ГДДР на мікроструктуру та магнетні властивості сплаву КС37. *Международная конференция «Высокие давления»*: Сборник тезисов докладов 12-й Международной конференции «Высокие давления – 2012. Фундаментальные и прикладные аспекты». 23-27 сентября 2012, Судак, Крым, Украина, 2012. С. 25.
  34. Bulyk I.I., Trostianchyn A.M., Burkhovetskyi V.V., Tarenkov V.Yu., Borukh I.V. Peculiarities of the HDDR process at low hydrogen pressures in Nd-Fe-B system alloys. *International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials”*: Book of abstracts International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO-2013). August 25 – September 1, 2013, Bukovel, 2013. P. 208.
  35. Лемішка І.А., Тростянчин А.М. Вплив механохімічної обробки у водні на фазовий стан сплаву  $Nd_{16}Fe_{73,9}Zr_{2,1}B_8$ . *Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи*: Матеріали XXIII Відкритої науково-технічної конференції молодих науковців і спеціалістів КМН-2013. 22-25 жовтня 2013, Львів, 2013. С. 229-232.
  36. Борух І.В., Тростянчин А.М., Бурховецький В.В. Вплив легування цирконієм на мікроструктуру сплаву  $Nd_2Fe_{14}B$ . *Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи*: Матеріали XXIII Відкритої науково-технічної конференції молодих науковців і спеціалістів КМН-2013. 22-25 жовтня 2013, Львів, 2013. С. 179-182.
  37. Булик І.І., Тростянчин А.М., Бурховецький В.В. Особливості змін мікроструктури у сплаві КС37 під час ГДДР. *Международная научная конференция «Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии»*: Тезисы IV Международной научной конференции «Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии» (НАНСИС-2013). 19-22 ноября 2013, Киев, 2013. С. 226.
  38. Булик І.І., Тростянчин А.М., Бурховецький В.В., Борух І.В. Розроблення способу виготовлення спечених магнітів з наноструктурних анізотропних порошків легованих сплавів на основі сполуки  $Nd_2Fe_{14}B$  і досліджування їх властивостей. *Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях*: Тези доповідей за проектами цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях». 9 грудня 2014, Київ, 2014. С. 50.
  39. Trostianchyn A.M., Bulyk I.I., Duriagina Z.A. The influence of Fe content on phase-structural state of  $Sm_2Co_{17}$  compound during hydrogen-vacuum treatment. *International research and practical conference Nanotechnology and nanomaterials*: Abs. International research and practical conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO-2021). 25-27 August 2021, Lviv, 2021. P. 22.
  40. Trostianchyn A., Izonin I., Tkachenko R., Duriagina Z. Prediction of magnetic remanence of Sm-Co magnets using machine learning algorithms. *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 463: Advances in computer science for engineering and manufacturing: proceedings of the International symposium (ISEM 2021), 24-26 December, Kiev, Ukraine. – P. 60–68 (Q4, Scopus).
- При проведенні досліджень, результати яких опубліковано у співавторстві, автору належать: синтезування зразків досліджуваних сплавів [1, 4, 6, 7, 10, 12, 15, 21, 22, 24, 25, 27-29, 34-36, 38, 39]; відпрацювання експериментальних режимів обробки матеріалів у середовищі водню шляхом ГДДР [1-4, 6-11, 13-15, 18, 20-29, 33-39] та

механохімічної обробки [9, 11, 12, 19, 20, 30-32]; результати досліджень впливу вихідного елементного складу і режимів водневої обробки на характер фазових перетворень та зміну фазово-структурного стану сплавів на основі сполуки  $\text{LaNi}_5$  [1, 4, 6, 24, 25, 27], систем  $\text{Sm-Co}$  [2, 3, 5, 7-9, 11, 13-15, 18-20, 23, 26, 28-33, 37, 39] та  $\text{Nd-Fe-B}$  [10, 12, 21, 22, 34-36, 38]; встановлення оптимальних технологічних параметрів формування анізотропної дрібнозеренної структури феромагнітних сплавів на основі РЗМ [18-21] та спікання порошків сплавів системи  $\text{Nd-Fe-B}$  [22]; створення вихідної бази даних та результати прогнозування магнітних властивостей сплавів системи  $\text{Sm-Co}$  методами машинного навчання [16, 17, 40].

- 4.7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозиумах, семінарах тощо.** Основні наукові результати та положення дисертаційної роботи були представлені, доповідалися та обговорювалися на міжнародних та вітчизняних конференціях: IX International Conference Hydrogen Materials Science & Chemistry of Carbon Nanomaterials (Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2005); XIX, XXII, XXIII Відкрит. наук.-техн. конф. молодих науковців і спеціалістів «Проблеми механічно-корозійного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи» (Львів, 2005, 2011, 2013), 5<sup>th</sup> Int. conf. Hydrogen economy and hydrogen treatment of materials (Donetsk, 2007), XI, XII, XIII Наук. конф. «Львівські хімічні читання» (Львів, 2007, 2009, 2011), 5<sup>th</sup> Int. Workshop on Functional and Nanostructured Materials (Lviv, 2008), 11<sup>th</sup> Int. conf. on crystal chemistry of intermetallic compounds (Lviv, 2010), 3<sup>rd</sup> Int. Materials Science conf. HighMatTech (Kiev, 2011), 12-й Межд. конф. «Высокие давления – 2012. Фундаментальные и прикладные аспекты» (Судак, Крым, Украина, 2012), Int. research and practice conf. «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2013, Bukovel, 2013 та NANO-2021, Львів, 2021), IV Межд. науч. конф. «Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии» (Киев, 2013), «Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях» (Київ, 2014), «International Symposium on Engineering and Manufacturing» (Київ, 2021).
- 4.8. Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати.** Отримані результати мають важливе наукове значення та можуть бути застосовані у галузях матеріалознавства, металургії та комп'ютерних наук, зокрема при викладанні таких навчальних курсів: «Порошкові та композиційні матеріали», «Сплави з особливими властивостями», «Функціональні наноматеріали», «Моделювання та оптимізація структури і властивостей матеріалів», «Технології наноматеріалів», «Теоретичні основи формоутворення», «Адитивні технології в ливарному виробництві», «Машинне навчання».
- 4.9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані.** Запропоновано здійснювати вибір технологічних параметрів водневої обробки функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних і перехідних з використанням розроблених алгоритмів обчислювального інтелекту. Запропоновано три способи отримання порошків феромагнітних сплавів систем  $\text{Sm-Co}$  та  $\text{Nd-Fe-B}$  з контрольованими фазовим складом, розміром структурних складових та параметром текстури: воднево-вакуумним термічним обробленням (патент України № 96810), помелом у водні (патент України № 96811) та гідруванням, диспропорціонуванням, десорбуванням, рекомбінуванням (ГДДР) під низьким тиском водню (патент України № 102899), а також спосіб спікання порошків феромагнітних сплавів системи  $\text{Nd-Fe-B}$  шляхом водневої обробки методом ГДДР (патент України № 105440). Створено робочі файли вихідної експериментальної бази даних залежності магнітних властивостей феромагнітних сплавів системи  $\text{Sm-Co}$  від хімічного та фазового складів сплавів, мікроструктури, наявності текстури для розробки алгоритму комп'ютерного прогнозування магнітних властивостей. Розроблено модель

прогнозування коерцитивної сили  $H_c$ , залишкової намагніченості  $M_r$  та максимального енергетичного добутку  $(BH)_{max}$  з використанням ансамблевих методів машинного навчання. Використання запропонованого підходу дозволяє значно спростити, скоротити та здешевити експериментальну перевірку впливу зазначених параметрів на магнітні властивості. Отримані наукові та експериментальні результати заплановано до використання при розробленні технологічного процесу отримання порошкових матеріалів, які використовуються для нанесення товстоплівкових функціональних покриттів в проектно-конструкторському виробничому підприємстві ТзОВ «КРЕДУВ», а також при розробленні комплексного підходу до створення багатофункціональних оксидних керамічних матеріалів та покриттів з використанням методів комп'ютерного моделювання в ТзОВ Виробничо-науковому підприємстві «СПЕЦРАМ». Також отримані результати досліджень впроваджено в навчальний процес кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів та кафедри систем штучного інтелекту НУ «Львівська політехніка» при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямками 132 «Матеріалознавство», 136 «Металургія» та 122 «Комп'ютерні науки».

**4.10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення.** Дисертаційна робота викладена професійно, кваліфіковано та грамотно. Матеріали логічно систематизовані та коректно оформленні. За структурою, мовою та стилем викладення дисертація відповідає вимогам МОН України.

**4.11. У докторській дисертації «Концепція застосування водневої обробки для удосконалення структурно-фазового стану та властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних та перехідних металів» матеріали кандидатської дисертації «Вплив водневої обробки на структуру і властивості промислових магнітних сплавів на основі систем Sm-Co і Dd-Fe-B» Тростянчина Андрія Миколайовича не використовувались.**

**4.12. Відповідність дисертації паспорту спеціальності, за якою вона представлена до захисту.** Робота відповідає вимогам паспорту спеціальності 05.02.01 *Матеріалознавство*, зокрема напряму досліджень: «Встановлення закономірностей зв'язку між показниками різних властивостей матеріалів».

У ході обговорення дисертаційної роботи до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи.

### 5. З урахуванням зазначеного, фаховий науковий семінар кафедри ухвалив:

5.1. Дисертаційна робота Тростянчина Андрія Миколайовича «Концепція застосування водневої обробки для удосконалення структурно-фазового стану та властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних та перехідних металів» є завершеною науковою працею, у якій на основі розробленої концепції розв'язано актуальну науково-прикладну проблему підвищення експлуатаційних властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів РЗМ шляхом ініційованих воднем фазових перетворень, що має важливе значення для матеріалознавства.

5.2. У 40 наукових публікаціях повністю відображені результати дисертації, з них 17 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав, які входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science, а також 5 патентів України на винахід.

5.3. Дисертація підготовлена за спеціальністю 05.02.01 *Матеріалознавство*, відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 *Матеріалознавство* (Перелік наукових спеціальностей, затверджений Наказом Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України 14 вересня 2011 року № 1057), та вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, п. 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197.

5.4. З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Тростянчина А.М. дисертаційна робота «Концепція застосування водневої обробки для удосконалення структурно-фазового стану та властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних та перехідних металів» рекомендується для подання до розгляду у спеціалізовану вчену раду з врахуванням композиційних, редакційно-стилістичних, технічних та граматичних поправок.

За затвердження висновку проголосували:

за	19	(дев'ятнадцять)
проти	-	(немає)
утримались	-	(немає)

Голова засідання,  
доцент кафедри матеріалознавства та  
інженерії матеріалів Національного  
університету «Львівська політехніка»,  
д.т.н., доц.

Кулик В.В.

Секретар,  
доцент кафедри матеріалознавства та  
інженерії матеріалів Національного  
університету «Львівська політехніка»,  
к.т.н., доц.

Богун Л.І.

Рецензенти:  
Завідувач кафедри прикладної фізики  
та наноматеріалознавства  
Національного університету «Львівська  
політехніка», д.т.н., проф

Андрущак А.С.

Професорка кафедри нафтогазової  
інженерії та зварювання Національного  
університету «Львівська політехніка»,  
д.т.н., ст.н.с.

Похмурська Г.В.

Професорка кафедри спеціалізованих  
комп'ютерних систем Національного  
університету «Львівська політехніка»,  
д.т.н., проф.

Клим Г.І.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

---