



ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з навчальної роботи
Національного технічного
університету України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”
к.т.н., доц.
Тетяна ЖЕЛЯСКОВА

“ 17 ” 03 2025 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 14/25 від 05.03.2025р. розширеного засідання
кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки
Навчально-наукового Інституту матеріалознавства та зварювання
імені Є.О. Патона
Національного технічного університету України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

БУЛИ ПРИСУТНІ:

- з кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки:

доц., к.т.н. Конорев С.І.; проф., д.т.н., проф. Макогон Ю.М.; ст. викл., к.т.н. Вербицька Т.І.; доц., к.т.н., доц. Іващенко Є.В.; зав. каф., д.ф.-м.н., проф. Карпець М.В.; доц., к.т.н., доц. Дудка О.І.; студент Пальчевський О.А.; доц., к.т.н. Орлов А.К.; проф., д.ф.-м.н., проф. Волошко С.М.; проф., д.т.н., проф. Доній О.М.; доц., к.т.н., доц. Бурмак А.П.; асп. Горпенко А.О.; к.т.н., доц. Холявко В.В.

- з кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії:

асп. Шеремет В.І.; проф., д.т.н., проф. Юркова О.І.; проф., д.т.н., академік НАНУ Лобода П.І.; асп. Наконечний С.О.

- запрошені з інших організацій:

старший науковий співробітник відділу фізики та технології жароміцних матеріалів, ІПМ імені І.М. Францевича НАН України, к.ф.-м.н., Рокицька О.А.

СЛУХАЛИ:

1. Повідомлення аспіранта кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки Науменка Максима Павловича за матеріалами дисертаційної роботи «Структурний стан та механічні властивості високоентропійних сплавів і боридів на основі 3d-перехідних металів з додаванням Al, Mo, W », поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань «13 – Механічна інженерія», за спеціальністю «132 - Матеріалознавство». Освітньо-наукова програма «Матеріалознавство».

Тему дисертаційної роботи «Структурний стан та механічні властивості високоентропійних боридних матеріалів на основі CrTiZrNbVMo» затверджено на засіданні Вченої ради Навчально-наукового Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона (протокол №14 від 29.11.2021 р.) та перезатверджено на засіданні Вченої ради Навчально-наукового Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона (протокол №14/24 від 30.12.2024 р.) «Структурний стан та механічні властивості високоентропійних сплавів і боридів на основі 3d-перехідних металів з додаванням Al, Mo, W»

Науковим керівником затверджений д.ф.-м.н. професор Карпець М.В.

2. Запитання до здобувача.

Запитання по темі дисертації ставили: д.т.н., проф. Макогон Ю.М.; к.т.н., доц. Дудка О.І.; к.т.н., доц. Холявко В.В.; к.т.н. Орлов А.К.; д.ф.-м.н, проф. Волошко С.М.; д.т.н., проф. Доній О.М.; к.т.н., доц. Бурмак А.П.;

3. Виступи за обговореною роботою.

В обговоренні дисертації взяли участь: д.т.н., проф. Юркова О.І.; д.т.н., проф., академік НАНУ Лобода П.І.; д.ф.-м.н, проф. Волошко С.М.; к.т.н. Орлов А.К.

УХВАЛИЛИ:

ПРИЙНЯТИ такий висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертаційного дослідження:

1. Актуальність теми дослідження

Високоентропійні матеріали, зокрема бориди на основі перехідних металів, є новим класом перспективних матеріалів завдяки їхнім унікальним структурним особливостям та поєднанню виняткових властивостей. Висока твердість, стабільність при високих температурах та механічна міцність роблять їх незамінними у багатьох сферах, зокрема в аерокосмічній галузі, енергетиці, ядерній техніці та виробництві надміцних інструментів.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю глибшого розуміння зв'язку між структурним станом високоентропійних боридів, їхніми фазовими перетвореннями та експлуатаційними властивостями. На сьогодні існує обмежена кількість даних щодо механізмів формування однофазних твердих розчинів у системах з багатокомпонентним складом, а також їхньої термічної та структурної стабільності в умовах високих

навантажень. Розробка нових підходів до їхнього синтезу, з використанням таких методів, як дуговий переплав та спікання, дозволить підвищити ефективність виробництва високоентропійних боридів з контрольованими характеристиками.

Висока міцність високоентропійних сплавів у литому, відпаленому та деформованому станах у широкому діапазоні температур пояснюється значним спотворенням кристалічної ґратки, спричиненим твердорозчинним зміцненням за рахунок присутності атомів різнорідних металів. Додаткове зміцнення можливе завдяки формуванню наноструктур або структур, пов'язаних зі спінодальним розпадом.

Окрім високої міцності, ВЕСи вирізняються високою твердістю в литому та відпаленому станах, а також термостабільністю структури та властивостей і високою зносостійкістю. Важливою перевагою цих сплавів є можливість регулювання їхньої структури шляхом зміни концентрації вихідних елементів, що дозволяє коригувати фізико-механічні властивості без необхідності складної термічної обробки. Водночас наявна література лише частково висвітлює вплив концентрації хімічних елементів на формування заданих структур ВЕСів, що обмежує розуміння цих процесів.

Вивчення змін структури нового класу сплавів, а також встановлення взаємозв'язків між хімічним і фазовим складом, структурою та фізико-механічними властивостями є важливим завданням металознавства й термічної обробки сплавів. Це відкриває перспективи суттєвої модифікації структурного та фазового стану ВЕС, що робить їх надзвичайно привабливими для застосування в машинобудуванні. Таким чином, актуальність даної роботи полягає у дослідженні цих питань.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертація виконувалася відповідно до плану наукових досліджень кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

3. Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

1. Вперше встановлено, що легування сплаву FeCoNiCrMn з ГЦК кристалічною структурою атомами алюмінію спричиняє зміну кристалічної ґратки в сплаві FeCoNiCrMnAl на ОЦК впорядковану по типу В2, а подальше додавання бору до цього сплаву приводить до зниження його твердості, що може бути обумовлено зміною механізму деформації з дислокаційного ковзання на двійникування.
2. Вперше систематично досліджено структурний стан та механічні властивості високоентропійних сплавів і їх боридів на основі 3d-перехідних металів з додаванням Al, Mo, W. Найвищі значення твердості та модуля Юнга одержані на боридах FeCoNiMnCrWB та FeCoNiCrMoWB. Основною фазою окалини при окисненні цих боридів є

високоентропійний оксид борату відповідних металів - $(Me)_2(BO_3)O$, зареєстрований у високоентропійних сплавах нами вперше.

3. Показано, що зниження кількості мангану у сплаві FeCoNiAlCrMn удвічі, має позитивний вплив не лише на його стійкість до окиснення, а і на покращення механічних властивостей сплаву за рахунок виділення значно меншої кількості крихкої σ -фази.
4. Вперше встановлено, що під час тривалого високотемпературного окиснення при 900 °C впродовж 50 годин на поверхні сплавів FeCoNiAlCrMn_{0,5} та FeCoNiAlCrMn формуються суцільні багатофазні оксидні плівки, які містять оксиди Mn₃O₄, FeMnO₃, шпінель NiMn₂O₄ та Al₂O₃. При цьому, в матриці сплавів відбувається спінодальний розпад впорядкованої ОЦК (B2) структури на суміш двох твердих розчинів, що мають ОЦК і ГЦК кристалічні структури та σ -фазу.
5. Вперше показано, що за рахунок зростання конфігураційної ентропії змішування при введенні четвертого металевого елементу до складу потрібних багатофазних боридів (Zr,Hf,Nb)B₂ та (Zr,Hf,Ta)B₂ відбувається формування однофазного твердого розчину (Zr,Hf,Nb,Ta)B₂ із гексагональною кристалічною структурою дибориду.

4. Теоретичне та практичне значення результатів роботи, впровадження

Одержані в дослідженні наукові результати та встановлені фізичні закономірності мають практичне значення для формування методичних і наукових засад розробки ВЕС, що дозволяють цілеспрямовано керувати їхньою структурою та властивостями. Крім того, вони сприяють ефективному використанню цього класу сплавів у створенні виробів із покращеним комплексом механічних характеристик. Розраховані в процесі виконання дисертаційної роботи кристалогеометричні характеристики фаз, які утворюються при легуванні високоентропійних сплавів бором та після їх окиснення при високих температурах, можуть слугувати довідниковим матеріалом при розробці та аналізі подібних систем.

Безпосередній практичний інтерес становлять:

- вплив концентрації елементів на фазовий склад;
- розподіл елементів між фазовими складовими;
- структура та фізико-механічні властивості ВЕС.

5. Апробація результатів дисертації

Основні результати роботи представлено на міжнародних конференціях: Міжнародна наукова конференція “Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 12 (НН ІМЗ ім. Є.О. Патона, Київ, - 2022); 12th International scientific and practical conference. “Perspectives of contemporary science: theory and practice” (13-15.01.2025, Lviv, Ukraine)

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 5 наукових праць: 2 наукові статті у фаховому виданні категорії А, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science, 1 наукова стаття у

виданнях іноземних держав, що індексується наукометричними базами даних Scopus та Web of Science, 2 публікації за матеріалами доповідей на конференціях.

6. Дотримання принципів академічної доброчесності

За результатами науково-технічної експертизи дисертація Науменка М.П. визнана оригінальною роботою, яка не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень.

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача

За результатами досліджень опубліковано 5 наукових публікації, у тому числі:

- 2 статті у наукових фахових виданнях України (на момент опублікування) за спеціальністю 132 Матеріалознавство;

в т.ч. 3 статті у яких число співавторів (разом із здобувачем) більше двох осіб;

- 3 статті у періодичних наукових фахових виданнях проіндексованих у базах Scopus та/або Web of Science Core Collection з зазначенням квартилю видання (якщо такий є);

- 2 тез виступів на наукових конференціях.

Статті:

1. O.A. Rokytska, M.V. Karpets, M.I. Yakubiv, M.O. Krapivka, A.V. Samelyuk, **M.P. Naumenko**. / High-Temperature Oxidation of High-Entropy AlCrFeCoNiMn_x Alloys // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2023. – 62. p. 360–371. <https://doi.org/10.1007/s11106-023-00399-w> (Q2, індексується базою даних Scopus та Web of Science). *Особистий внесок здобувача*: дослідження мікроструктури ВЕСів, обробка отриманих дифрактометричних спектрів, розрахунок фазового складу до та після окиснення, визначення механічних властивостей сплавів, узагальнення отриманих даних, участь у формуванні тексту та висновків публікації.

2. D. Vedel, P. Mazur, O. Grigoriev, I. Kozak, L. Melakh, **M. Naumenko**, M. Karpets, M. Skoryk, A. Zavdoveev. / Densification, microstructure and hardness of middle entropy ceramics based on transition metals diboride. // Functional materials. – 2024. – 31(3). – p. 371-376. <https://doi.org/10.15407/fm31.03.371> (Q4, індексується базою даних Scopus та Web of Science). *Особистий внесок здобувача*: визначення мікроструктури та фазового складу отриманих сплавів, обробка отриманих дифрактометричних спектрів, узагальнення отриманих даних, формування тексту та висновків публікації.

3. S.V. Maksymova, P.V. Kovalchuk, V.V. Voronov, M.V. Karpets, **M.P. Naumenko**. / Effect of Ge and In on the structure and thermodynamic characteristics of high-entropy MnCoNiCu alloys. // Welding in the World. – 2024. <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01879-2> (Q2, індексується базою даних Scopus та Web of Science). *Особистий внесок здобувача*: обробка отриманих

дифрактометричних спектрів, узагальнення отриманих даних, формування рисунків та тексту публікації.

Матеріали конференцій:

4. Д. Ведель , П. Мазур , О. Григор'єв , І. Козак , Л. Мелах , М. Науменко, М. Карпець, М. Скорик, А. Завдовесв. / Вплив температури та часу витримки на формування твердого розчину для середньоентропійних диборидів // Міжнародна наукова конференція «МАТЕРІАЛИ ДЛЯ РОБОТИ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ – 12» // НН ІМЗ ім. Є.О. Патона, Київ. – 15 груд. 2022р. – ст. 115-117.

5. М.П. Науменко, М.В. Карпець, О.А. Рокицька, О.І. Дудка. / Фазові перетворення у високоентропійних боридах на основі сплаву Кантора. // XII Міжнародна науково-практична конференція «PERSPECTIVES OF CONTEMPORARY SCIENCE: THEORY AND PRACTICE» // м. Львів. – 13-15.01.2025. – ст. 455-461.

Якість та кількість публікацій відповідають “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 від 12 січня 2022 р. № 44”.

ВВАЖАТИ, що дисертаційна робота Науменка М.П. «Структурний стан та механічні властивості високоентропійних сплавів і бориридів на основі 3d-перехідних металів з додаванням Al, Mo, W», що подана на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань «13 - Механічна інженерія», за спеціальністю «132 - Матеріалознавство» за своїм науковим рівнем, новизною отриманих результатів, теоретичною та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам, що пред'являють до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії та відповідає напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми КІП ім. Ігоря Сікорського «Матеріалознавство».

РЕКОМЕНДУВАТИ:

1. Дисертаційну роботу “Структурний стан та механічні властивості високоентропійних сплавів і бориридів на основі 3d-перехідних металів з додаванням Al, Mo, W”, подану Науменком Максимом Павловичем на здобуття наукового ступеня доктора філософії, до захисту у разовій спеціалізованій вченій раді.

2. Вченій раді КІП ім. Ігоря Сікорського утворити разову спеціалізовану вчену раду у складі:

Голова:

Доктор технічних наук, професор, професор кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського **Юркова Олександра Іванівна.**

Члени:

Рецензенти:

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри ливарного виробництва Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського **Ямшинський Михайло Михайлович.**

Доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського **Волошко Світлана Михайлівна;**

Офіційні опоненти:

Доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, заступник директора з наукової роботи Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова, НАН України, **Фірстов Георгій Сергійович.**

Кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу фізико-хімії сплавів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України, **Сергієнко Руслан Арсенійович.**

Головуючий на засіданні:

к.т.н., доцент,
заступник завідувача
кафедри ФМТО



Олександр ДУДКА

Вчений секретар
кафедри ФМТО:
к.т.н.



Сергій КОНОРЕВ