

## **В І Д Г У К**

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Марича Мирослава Васильовича** «Особливості структуроутворення та формування властивостей при виготовленні полікомпонентних еквіатомних сплавів на основі системи Ti-Cr-Fe-Ni» поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали.

### **Актуальність теми дисертації та відповідність роботи спеціальності 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали**

Сучасний розвиток промисловості висуває жорсткі вимоги до матеріалів різного функціонального призначення, які мають забезпечувати високі експлуатаційні характеристики, можливості працювати в екстремальних умовах. В останні роки створюються нові технології і на їх основі розробляються нові високолеговані сплави, до яких відносяться високоентропійні сплави (ВЕС), що включають до 5–10 основних елементів, які знаходяться у шихтовому стані в еквіатомному співвідношенні.

Високоентропійні матеріали мають високі характеристики міцності та твердості, високої корозійної стійкості, що дозволяє створювати деталі, які можуть працювати в при високих температурах і значних циклічних навантаженнях без втрати міцності.

Враховуючи те, що більшість створених на сьогоднішній день ВЕСів містять в значних кількостях такі високовартісні та дефіцитні елементи, як Co, W, V, Nb, Mo, Ta тощо, що значно звужує економічну доцільність їх широкого практичного застосування, стає актуальним розробка нових компонентних складів таких сплавів на основі менш витратних і відносно дешевих та доступних складових за умови забезпечення високих фізико-механічних та експлуатаційних властивостей останніх.

Актуальність роботи підтверджується також і тим, що дана дисертація є узагальненням наукових результатів, отриманих за участю автора при виконанні науково-дослідних тем в рамках тем відомчого замовлення в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

З погляду вищезазначеного, надана до розгляду дисертаційна робота є актуальною, а представлений матеріал наукових досліджень змістовно відповідає спеціальності 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали.

## **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі, їх достовірність**

Аналіз дисертації та автореферату Марича М.В. показав, що висунуті наукові положення, висновки та рекомендації, які викладені в роботі, повною мірою обґрунтовані на підставі глибокого аналізу здобувачем літературних джерел, що стосуються високоентропійних сплавів, а також результатів власних досліджень.

Достовірність результатів роботи забезпечена коректністю постановки задач і застосуванням сучасних методів лабораторного експерименту з використанням сучасного лабораторного устаткування, стандартних методів випробувань і сертифікованих вихідних компонентів. Вона підтверджується зіставленням отриманих результатів з відомими аналітичними й експериментальними даними і їх інтерпретацією, що узгоджується з існуючими теоретичними розробками в галузі матеріалознавства.

### **Наукова новизна отриманих у роботі результатів.**

У дисертаційній роботі одержано ряд нових теоретичних та експериментальних результатів. До найбільш вагомих наукових положень, отриманих в результаті виконання роботи, на мій погляд відносяться наступні:

1. Автором вперше запропоновано полікомпонентні склади та науково обґрунтовано технологічні схеми отримання із застосуванням методів порошкової металургії безкобальтових еквіатомних сплавів на основі системи Ti-Cr-Fe-Ni, які за рівнем основних механічних характеристик не поступаються, а в ряді випадків і переважають відповідні характеристики сплавів, отриманих з використанням суттєво більш високовартісних сплавів.

2. На основі системних досліджень еволюції мікроструктури та фазового складу високоентропійних сплавів різних компонентних груп встановлено закономірності їх фазоутворення, що полягають в наступному: фазовий склад сплаву TiCrFeNiCu включає переважно дві багатокомпонентні фази з ГЦК структурою, в невеликій кількості фіксуються піки ОЦК структури та інтерметаліди, тоді як структурний склад сплавів TiCrFeNiCuC та TiCrFeNiC представлений головним чином двома твердорозчинними фазами заміщення з ГЦК і ОЦК структурами з дисперсними включеннями карбідів TiC і Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

3. В роботі вперше показано та науково обґрунтовано ефективність застосування технології гарячого штампування для отримання полікомпонентних еквіатомних сплавів (зокрема – на основі системи Ti-Cr-Fe-Ni), що дозволило забезпечити практично безпористий стан матеріалу та досягнути більш високого рівня основних механічних характеристик у порівнянні зі спеченими сплавами аналогічних компонентних складів.

4. Автором вперше показано, що гаряче штампування не тільки призводить до суттєвого диспергування структурних елементів сплавів однакових компонентних складів, але і на відміну від відносно ізотропних структур спечених сплавів, гарячештамповані сплави після штампування та відпалу при 1200 та 1250 °С характеризуються наявністю суттєво шаруватої структури із шарами товщиною 1÷10 мкм, що розташовані у напрямку, перпендикулярному напрямку штампування.

#### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

За матеріалами дисертації опубліковано **18** наукових праць, зокрема **7** статей у наукових фахових виданнях, з них – **2** статті у виданнях іноземної держави, **5** статей у виданнях України (**2** статті включені до наукометричної бази даних Scopus); 11 публікацій в матеріалах науково-технічних конференцій.

Вказані публікації, в цілому, відображають основний зміст дисертації, об'єм і характер проведених теоретичних і практичних досліджень. Аналіз друкованих праць дає підставу вважати, що наукові положення, висновки та рекомендації, які викладено в дисертаційній роботі, повністю висвітлено в наукових працях.

Дисертація та автореферат написані грамотно, лаконічно, стиль викладення матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує легкість і доступність їх сприйняття. Автореферат дисертації повністю відображає зміст дисертаційної роботи.

#### **Оцінка змісту дисертації, її завершеності та відповідності встановленим вимогам**

Дисертаційна робота Марича М.В. складається із вступу, **5** розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Викладена на **5,29** авторських аркушах, включає **76** рисунків, **20** таблиць, **5** додатків, список використаних джерел із **151** найменування.

У **вступі** належним чином обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та задачі дослідження, відображено наукову новизну і практичну цінність роботи, наведено відомості щодо апробації роботи та публікації за темою дисертації.

В **першому** розділі наведено ґрунтовний аналіз літературних даних щодо технологій створення високоентропійних матеріалів з новим рівнем фізико-механічних та функціональних властивостей. Проведено огляд основних світових промислових технологій отримання сплавів ВЕС, зокрема технологій механічного легування.

За результатами критичного аналізу літературних даних сформульовано мету та визначено основні завдання досліджень.

У **другому** розділі описано методи та методики, що використовувалися при експериментальних та теоретичних дослідженнях. Перелічено вихідні матеріали, технології виготовлення полікомпонентних сплавів, методи їх дослідження та випробування, описано устаткування, використане в роботі.

Також описано стандартні методи досліджень мікроструктури, фазового і хімічного складу матеріалу, механічних і функціональних властивостей.

У **третьому** розділі наведено результати досліджень впливу механоактивації на структурні параметри порошкових еквіатомних сплавів на основі системи Ti-Cr-Fe-Ni. Наведено аналіз результатів вивчення рентгенівських спектрів вихідної суміші складу TiCrFeNiCu після її розмелювання у планетарному млині протягом 30 ÷ 120 хвилин. Показано, що зі збільшенням тривалості розмелювання інтенсивність дифракційних ліній ґраток ОЦК, ГЦК і ГЦУ знижується одночасно з їх розширенням. Обчислені кількісні значення елементів тонкої структури компонентів – істинне фізичне розширення  $\beta$ , величини областей когерентного розсіювання (ОКР), мікродеформації  $\varepsilon$ , щільності дислокацій  $\rho$ . Показано, що використання механоактивації дозволяє значно збільшити реакційну поверхню порошків, дефектність їх кристалічної структури, що прискорює процес сплавоутворення при подальшій термообробці та позитивно впливає на властивості сплавів.

У **четвертому** розділі представлено результати порівняння впливу методу виготовлення на структуроутворення та фазовий склад отриманих еквіатомних сплавів TiCrFeNiCu, TiCrFeNiCuC та TiCrFeNiC. Розраховано параметри тонкої структури спечених і гарячештампованих сплавів. Аналіз характеру профілів рентгенівських ліній ґраток свідчить про те, що механоактивація призводить до формування дислокаційної структури, яка істотно впливає на властивості матеріалу.

Показано, що гаряче штампування призводить до суттєвого диспергування та підвищення мікротвердості структурних елементів сплавів у порівнянні зі спеченими сплавами аналогічних компонентних складів, що відображається більшим ступенем дефектності кристалічних структур.

У **п'ятому** розділі представлено результати дослідження механічних властивостей виготовлених еквіатомних полікомпонентних сплавів. За результатами автоматичного індентування встановлено, що найкращими механічними характеристиками з поміж усіх інших досліджених володіє сплав TiCrFeNiC. Висока твердість та міцність пов'язані передусім з двома факторами – ефектом значного спотворення кристалічної ґратки та синтезом карбідів хрому та титану *in situ*. Також у цьому розділі описано дослідно-

промислову апробацію результатів роботи. Дослідно-промислова апробація розроблених матеріалів здійснювалася в умовах ТОВ «Інтер-Контакт-Пріор». Зважаючи на високу зносостійкість та міцність розробленого еквиатомного сплаву TiCrFeNiC рекомендовано його застосування як конструкційного матеріалу для виготовлення сідел клапанів насосів для перекачування високов'язких середовищ при температурі до 250 °С та в'язкості середовища до 22,5 Ст.

Дисертаційна робота містить науково обґрунтовані та раніше не захищені наукові положення, якісний експериментальний матеріал і достовірні, чітко сформульовані висновки, що в сукупності може бути охарактеризовано як успішне вирішення наукової проблеми.

### **Практичне значення результатів роботи**

Автором розроблено технологію для отримання полікомпонентних сплавів типу високоентропійних. У розробленій технології проводилася механоактивація шихти та за рахунок оптимізації елементного складу полікомпонентного сплаву TiCrFeNiC, отриманого методом гарячого штампування, механічні властивості якого перевищують властивості багатьох сучасних сплавів даного класу.

За результатами дослідно-промислової апробації розроблених матеріалів на ТОВ «Інтер-Контакт-Пріор» полікомпонентний сплав системи Ti-Cr-Fe-Ni-C прийнятий до впровадження для виготовлення сідел клапанів насосів НМШ 5/25-2,5/6 для перекачування високов'язких середовищ при температурах до 200 °С та знаходиться у стадії підготовки виробництва. (Акт використання результатів дисертаційної роботи від 25.11.2019 р.)

### **Загальні зауваження щодо змісту дисертації**

Попри загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, у ній присутній ряд недоліків, по яких можуть бути сформульовані наступні зауваження:

1. В авторефераті на стор 17 зазначено: «у гарячештампованих сплавів твердість закономірно вища, ніж у спечених, що пов'язано із впливом поруватості», хоча, насамперед, більш висока твердість після штампування пояснюється більш дрібним розміром зерен, що підтверджується її зменшенням після відпалу і процесами рекристалізації.

2. В дисертації дублюються рисунки, а саме наведено залежності густини і пористості (стор. 91 рис. 3.7, стор. 93 рис. 3.8, стор 95 рис. 3.9), для багатокомпонентних сплавів варто було представити тільки пористість.

3. Перший та другий розділи перенасичені схемами та фотографіями стандартного обладнання.

### **Загальний висновок по дисертації.**

Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Вважаю, що дисертаційна робота Марича М.В. є завершеною науковою працею, містить одержані автором нові наукові та прикладні результати в галузі порошкової металургії та функціональних матеріалів, які в сукупності розв'язують актуальні науково-технічні проблеми розробки основ формування властивостей високоентропійних сплавів.

Автореферат повною мірою відповідає змісту та основним положенням дисертації, а робота загалом повністю відповідає вимогам пунктів 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567; її зміст відповідає паспорту спеціальності 05.16.06 – Порошкова металургія та композиційні матеріали, а автор дисертації – Марич Мирослав Васильович, заслуговує присудження науковою ступеня кандидата технічних наук за відповідною спеціальністю.

Офіційний опонент,  
доцент кафедри високотемпературних матеріалів  
та порошкової металургії Національного технічного  
університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,

кандидат технічних наук



Анатолій МІНІЦЬКИЙ

Підпис Анатолія МІНІЦЬКОГО ЗАСВІДЧУЮ

Учений секретар  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Валерія ХОЛЯВКО