

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Ліхацького Івана Федоровича на тему

«Розроблення ливарних високоентропійних сплавів з підвищеним вмістом алюмінію і технологій їх одержання», представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія

Актуальність теми дисертації. Дисертаційна робота Ліхацького Івана присвячена актуальній проблемі сучасного матеріалознавства та металургії – розробленню ливарних високоентропійних сплавів як перспективного класу конструкційних матеріалів, а також дослідженню впливу підвищеного вмісту алюмінію на формування їхньої структури та властивостей.

Особливої уваги заслуговує використання алюмінію як одного з основних компонентів таких сплавів. Підвищення його вмісту дає змогу зменшити густину матеріалу та його корозійну стійкість, що розширює можливості застосування таких сплавів в якості конструкційних матеріалів, зокрема в умовах впливу агресивних середовищ. Водночас алюміній істотно впливає на процеси формування структури: змінює концентрацію валентних електронів, сприяє утворенню ОЦК-, В2- та інтерметалідних фаз, а також посилює мікросегрегацію під час кристалізації. Унаслідок цього прогнозування фазового складу сплавів із підвищеним вмістом алюмінію стає складнішим.

Актуальність дослідження зумовлена недостатнім рівнем вивченості ливарних високоентропійних сплавів. Попри значний інтерес до високоентропійних матеріалів загалом, у світовій науковій літературі порівняно мало робіт присвячено закономірностям формування структури та властивостей ВЕС безпосередньо в литому стані. Недостатньо дослідженими залишаються їхні ливарні властивості, особливості кристалізації, засвоєння компонентів під час плавлення та можливість одержання об'ємних литих заготовок із прогнозованою структурою і комплексом властивостей. Тому розроблення наукових і технологічних засад одержання ливарних ВЕС є актуальним завданням сучасного матеріалознавства та металургії.

Таким чином, обрана тема дисертаційної роботи є актуальною для розвитку наукових і технологічних засад одержання ливарних високоентропійних сплавів із зниженою густиною, а також відповідає сучасним потребам у створенні легких конструкційних матеріалів із комплексом підвищених механічних і корозійних властивостей.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Достовірність отриманих результатів забезпечується поєднанням розрахункових методів прогнозування фазоутворення із широкою експериментальною складовою та сучасними методами визначення хімічного складу, дослідження структури та фазового стану, а також оцінювання ливарних, механічних і корозійних властивостей.

Дослідження виконано послідовно: від аналітичного огляду проблематики та формулювання ідеї і мети досліджень, аналізу умов фазоутворення та вибору систем легування до розроблення технології плавлення й одержання литих зразків, а також визначення взаємозв'язку між їхнім складом, технологією виготовлення, структурно-фазовими характеристиками та широким спектром властивостей. Дослідження трьох систем Al-Si-Cu-Ni-Zn, Al-Cr-Mn-Fe-Co-Ni-Cu та Al-Cr-Mn-Fe-Ni-Cu дає змогу зіпівставити експериментальні композиції з відомими системами на основі перехідних металів.

Одержані експериментальні результати дисертаційної роботи узгоджуються з існуючими теоріями, відомими практичними напрацюваннями та між собою. Зокрема, зростання вмісту алюмінію знижує VEC (концентрацію валентних електронів) і підсилює схильність до утворення ОЦК- та В2-складових; високий вміст міді сприяє утворенню мікросегрегацій, а часткова заміна міді кобальтом стабілізує більш однорідний структурно-фазовий стан.

Наукова новизна дисертації сформульована коректно і відповідає фактичному змісту виконаних досліджень. До найвагоміших положень належать:

1. Набули подальшого розвитку підходи і принципи розроблення та одержання високоентропійних сплавів зі зменшеною густиною, вмістом алюмінію 5–50 ат. % і температурою плавлення нижче 1000 °С. Експериментально показано можливість одержання еквіатомного сплаву системи Al-Si-Cu-Ni-Zn плавленням у печі опору за температури близько 925 °С.

2. Вперше показано, що за вмісту алюмінію 20 ат. % у сплавах системи Al-Cr-Mn-Fe-Co-Ni-Cu можливе формування фазового складу без інтерметалідної складової та виражених міжзеренних сегрегацій. Встановлено, що цьому сприяють зниження вмісту міді приблизно до 5 ат. % і введення близько 10 ат. % кобальту, які підвищують концентрацію валентних електронів і стабілізують тверді розчини.

3. Вперше досліджено корозійну стійкість високо- та середньоентропійних сплавів систем Al-Si-Cu-Ni-Zn і Al-Cr-Mn-Fe-Co-Ni-Cu у низці корозійно-активних середовищ. На прикладі сплавів

$\text{Al}_5\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{17}\text{Fe}_{17}\text{Co}_{14}\text{Ni}_{17}\text{Cu}_{10}$ та $\text{Al}_{20}\text{Cr}_{15}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_5$ показано, що збільшення вмісту алюмінію навіть за одночасного зниження вмісту хрому здатне зменшувати втрату маси щонайменше на 20-30 % навіть в лужному середовищі та 6% водному розчині хлористого заліза, який представляє найбільш агресивні корозійні умови.

4. Вперше оцінено можливість одержання з'єднань між високо- або середньоентропійними сплавами і алюмінієм за умов контакту твердого ВЕС/СЕС з рідким алюмінієм. Встановлено визначальний вплив хімічного складу твердої вставки та тривалості контакту за початкової температури алюмінієвого розплаву не нижче 720 °С і показано формування щільного рівномірного інтерметалідного шару на основі Al_3Fe , інтенсивність утворення якого зменшується зі зростанням концентрації алюмінію у ВЕС/СЕС.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

Дисертаційна робота має логічну структуру і складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатка. Обсяг роботи становить 174 сторінки, вона містить 16 таблиць і 31 рисунок, список використаних джерел включає 116 найменувань. Структура дисертації відповідає поставленій меті та забезпечує послідовне розкриття теми.

У вступній частині належним чином обґрунтовано актуальність, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, наведено методи дослідження, сформульовано наукову новизну і практичне значення результатів.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану досліджень високоентропійних, середньоентропійних та складноконцентрованих сплавів, проблемам їх застосування і перспективам використання алюмінійвмісних систем для одержання ВЕС/СЕС зі зниженою густиною, підвищеною корозійною стійкістю та технологічністю одержання ливарними способами.

У подальших розділах розглянуто методичні підходи до проектування складів, технології плавлення і лиття, наведено результати структурно-фазових досліджень, ливарні властивості, механічні характеристики, дані про корозійну стійкість та особливості взаємодії експериментальних сплавів із рідким алюмінієм. Така побудова роботи є завершеною і дозволяє простежити шлях від вибору складу сплавів до оцінки практичних перспектив застосування одержаних нових ливарних ВЕС/СЕС з підвищеним вмістом алюмінію.

Оформлення графічних матеріалів, таблиць і результатів досліджень загалом сприяє розумінню отриманих результатів та розкриває їх суть. Викладення матеріалу є науково обґрунтованим, термінологія відповідає галузі металургії та матеріалознавства.

За змістом дисертаційної роботи ознак порушення принципів академічної доброчесності не виявлено, а перевірка на плагіат показує відсоток цитувань і запозичень менше 10%. Використані літературні джерела є сучасними та переважно англomовними і відносяться до провідних журналів світового рівня.

За результатами аналізу звіту про подібність тексту та перевірки дисертаційної роботи на наявність текстових збігів встановлено, що дисертаційна робота Ліхацького Івана Федоровича є самостійним завершеним науковим дослідженням здобувача та не містить ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації, компіляції чи неправомірного використання результатів досліджень інших авторів.

Виявлені текстові збіги переважно стосуються загальноновживаної наукової термінології, усталених назв методів дослідження, характеристик матеріалів та технологічних процесів, бібліографічних описів, а також фрагментів власних наукових публікацій здобувача, у яких попередньо оприлюднено результати дисертаційного дослідження. Запозичені з наукових праць інших дослідників положення, фактичні дані та результати супроводжуються належними бібліографічними посиланнями. Порушень принципів академічної доброчесності в дисертаційній роботі не виявлено.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірності.

Наукові положення дисертації є достатньо обґрунтованими. Найбільш переконливою є та частина роботи, де порівнюються розрахункові очікування з фактичним фазовим і структурним станом литих сплавів. Саме цей матеріал демонструє, що для таких систем важливим є не лише номінальний хімічний склад, а й характер кристалізації.

Висновки щодо ливарних властивостей мають практичний інтерес. Зокрема, показано різний характер впливу Al у системах різного складу: у низькотемпературній (з низькою температурою плавлення) системі Al-Si-Cu-Ni-Zn збільшення частки Al сприяє покращенню рідкоплинності, тоді як у сплавах з перехідними металами надмірний вміст Al може погіршувати рідкоплинність через раннє формування твердої фази.

Механічні результати інтерпретовано обережно. Автор не завищує прикладних можливостей досліджених складів і прямо фіксує обмеження, пов'язані з крихким руйнуванням частини зразків. Це підвищує довіру до зроблених узагальнень і залишає простір для подальшої оптимізації складу та термічної обробки.

Наукові положення та висновки, розвинуті у дисертації є обґрунтованими та базуються на комплексному використанні аналітичних, розрахункових і експериментальних принципів досліджень. У роботі проведено аналіз сучасного стану досліджень високоентропійних,

середньоентропійних і складноконцентрованих сплавів, виконано розрахункове прогнозування їх структуро- та фазоутворення за термодинамічними, електронними, кристалохімічними та фізико-хімічними критеріями, а також здійснено експериментальну перевірку одержаних результатів та запропоновано новітні підходи використання одержаних матеріалів.

Висновки, сформульовані в дисертації, узгоджуються із сучасними науковими уявленнями щодо закономірностей формування структури та фазового складу багатокомпонентних металевих систем. Отримані результати підтверджують, що фазовий стан ливарних високоентропійних і середньоентропійних сплавів із підвищеним вмістом алюмінію визначається не лише величиною конфігураційної ентропії, а комплексною дією ентальпійних, електронних, кристалохімічних і технологічних чинників. Обґрунтовано вплив вмісту алюмінію на густину, фазову стабільність, рідкотекучість, механічні характеристики та корозійну стійкість досліджених сплавів систем Al-Si-Cu-Ni-Zn, Al-Cr-Mn-Fe-Co-Ni-Cu та Al-Cr-Mn-Fe-Ni-Cu.

Повнота опублікованих результатів дисертації.

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 9 наукових праць, зокрема 5 наукових статей, у яких представлено основні наукові результати дисертації, та 4 тези доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій. Із п'яти наукових статей одна опублікована в іноземному науковому виданні, віднесеному до другого квартиля (Q2), а чотири – у наукових фахових виданнях України категорії «Б». Зазначені публікації повністю відображають основний зміст дисертації, обсяг і характер проведених теоретичних та експериментальних досліджень.

Апробація матеріалів дисертації.

Основні положення та результати дисертаційної роботи оприлюднено на чотирьох міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференціях: XV Міжнародній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (м. Київ, 2023 р.); XXI Ювілейній Міжнародній науково-практичній конференції «Металеві матеріали, процеси виготовлення та перспективи їх застосування в промисловості України» (м. Київ, 2025 р.); IX International Scientific and Practical Conference «The Future of Science: The Latest Research and Innovations» (м. Стокгольм, Швеція, 2026 р.); XVI Міжнародній науково-технічній конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» (м. Дніпро, 2026 р.).

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. Доцільно було б детальніше обґрунтувати вибір концентраційних інтервалів компонентів у системах Al-Si-Cu-Ni-Zn, Al-Cr-Mn-Fe-Co-Ni-Cu

та Al–Cr–Mn–Fe–Ni–Cu, зокрема відсутність послідовного варіювання вмісту алюмінію.

2. Бажано було б докладніше проаналізувати випадки невідповідності між розрахунковим прогнозом і фактично встановленим фазовим складом та оцінити точність застосованих критеріїв.

3. Під час оцінювання рідкоплинності доцільно було б врахувати температури ліквідусу сплавів і забезпечити однаковий перегрів розплаву, щоб відокремити вплив складу від впливу температури заливання.

4. Дослідження механічних властивостей варто було б доповнити фрактографічним аналізом і оцінкою впливу фазового складу, мікросегрегації та міжфазних меж на крихке руйнування.

5. Для оцінювання практичної придатності з'єднань між дослідженими сплавами та алюмінієм бажано було б визначити їх механічну міцність, мікротвердість перехідної зони та схильність інтерметалідних прошарків до утворення тріщин.

6. У тексті трапляються окремі термінологічні, стилістичні та редакційні неточності, які доцільно усунути.

Висновок про дисертаційну роботу.

Висловлені зауваження не знижують наукової та практичної цінності дисертації. Робота є завершеним дослідженням, у якому розроблено і обґрунтовано технологічні підходи до одержання ливарних високоентропійних і середньоентропійних сплавів з підвищеним вмістом алюмінію, а також встановлено закономірності формування їх структури та властивостей.

Дисертація Ліхацького Івана Федоровича на тему «Розроблення ливарних високоентропійних сплавів з підвищеним вмістом алюмінію і технологій їх одержання» відповідає вимогам чинного законодавства України до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. Здобувач заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри фізичного
матеріалознавства та термічної обробки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського», МОН України
д-р фіз.-мат. наук, професор

