

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.

На сучасному етапі розвитку матеріалознавства та технологій одержання металевих матеріалів одним із найдинамічніших напрямів є створення нових багатокомпонентних металевих систем, здатних забезпечити поєднання високих механічних, експлуатаційних і технологічних характеристик. Особливе місце серед таких матеріалів займають високоентропійні та середньоентропійні сплави, концепція яких принципово відрізняється від традиційного підходу до легування металів. Якщо класичне матеріалознавство ґрунтується на використанні одного базового елемента з незначними добавками легувальних компонентів, то сучасні високоентропійні системи передбачають одночасне використання кількох основних елементів у близьких атомних концентраціях, що забезпечує реалізацію комплексу специфічних фізико-хімічних ефектів, насамперед – високої ентропії змішування, уповільненої дифузії, локальних викривлень кристалічної ґратки, тощо.

Саме завдяки таким особливостям високоентропійні матеріали останніми роками стали одним із пріоритетних об'єктів досліджень світового матеріалознавства. Їх розглядають як перспективну основу для створення конструкційних матеріалів нового покоління, здатних працювати в умовах високих механічних навантажень, циклічної втоми, інтенсивного зношування, агресивних середовищ та підвищених температур. Разом із тим, переважна більшість опублікованих досліджень стосується сплавів, одержаних методами

вакуумного дугового або індукційного переплаву, тоді як питання створення технологічно доступних ливарних високоентропійних матеріалів залишаються недостатньо вивченими. Це істотно обмежує можливості їх практичного впровадження у промисловість, оскільки саме ливарні технології забезпечують найбільш економічно доцільне приготування таких сплавів, так і виготовлення заготовок і навіть складнопрофільних деталей з них.

Особливої актуальності в цьому контексті набуває проблема створення високоентропійних сплавів із підвищеним вмістом алюмінію. Використання алюмінію як одного з основних компонентів дозволяє суттєво зменшити густину матеріалу, підвищити його питому міцність, покращити жаростійкість та знизити собівартість за рахунок використання доступнішої сировини. Водночас, введення значних концентрацій алюмінію супроводжується низкою складних металургійних проблем, пов'язаних із формуванням крихких інтерметалідних фаз, ліквідаційною неоднорідністю, зміною характеру кристалізації та погіршенням технологічності процесів лиття. Саме тому встановлення закономірностей структуроутворення в подібних багатокомпонентних системах є важливою науковою задачею, вирішення якої має не лише фундаментальне, а й важливе та прикладне значення з огляду на світову тенденцію до підвищення енергоефективності конструкцій та зменшення їх маси, розроблення нових алюмінійвмісних високоентропійних сплавів.

Таким чином, можна зробити висновок, що тема дисертаційної роботи є актуальною як з фундаментальної точки зору розвитку матеріалознавства складноконцентрованих металевих систем, так і з позицій вирішення важливих прикладних завдань зі створення нових ливарних конструкційних матеріалів зі зниженою густиною, підвищеним комплексом механічних і експлуатаційних властивостей та високою технологічністю виготовлення.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та наукової новизни.

Однією з визначальних переваг дисертаційної роботи Ліхацького І.Ф. є високий рівень обґрунтованості отриманих наукових результатів, що досягнуто

завдяки логічній послідовності виконання досліджень, комплексному використанню сучасних методів аналізу та узгодженості теоретичних положень із результатами експериментальних досліджень.

Автором побудовано цілісну методологію дослідження, яка охоплює всі етапи створення нових алюмінійвмісних високоентропійних та середньоентропійних сплавів – від аналізу сучасного стану проблеми та вибору перспективних систем легування до прогнозування фазового складу, експериментального виготовлення сплавів, дослідження їх мікроструктури, фазового складу, технологічних, механічних та корозійних властивостей. Така структура досліджень забезпечує зрозумілу логіку роботи та дозволяє простежити причинно-наслідкові зв'язки між хімічним складом, умовами одержання, особливостями фазоутворення та експлуатаційними характеристиками матеріалів.

Слід відзначити, що при виборі складів дослідних сплавів автор не обмежився емпіричним підходом, а використав сучасні критерії прогнозування фазоутворення у складноконцентрованих системах. Застосування параметрів конфігураційної ентропії змішування, ентальпії змішування, різниці атомних радіусів, концентрації валентних електронів та інших критеріїв дозволило обґрунтовано сформувати склади експериментальних сплавів і суттєво знизити ризик отримання композицій із небажаним структурно-фазовим складом. Важливо, що результати теоретичного прогнозування були надалі підтверджені експериментальними дослідженнями, що свідчить про правильність обраного наукового підходу.

Достовірність отриманих результатів, одержаних дисертантом, забезпечується застосуванням комплексу взаємодоповнювальних сучасних методів досліджень. Автор не обмежився аналізом структурно-фазового стану, а доповнив його визначенням рідкоплинності, механічних характеристик та корозійної стійкості експериментальних сплавів. Саме такий підхід дозволяє об'єктивно оцінити перспективність нових матеріалів не лише з наукової, а й із практичної точки зору.

Наукова новизна дисертаційної роботи є достатньо обґрунтованою та підтверджується низкою результатів, одержаних автором вперше:

- Насамперед заслуговує на увагу розвиток підходів до створення алюмінійвмісних високоентропійних сплавів зі зниженою температурою плавлення, придатних для виготовлення традиційними ливарними методами. Запропонований підхід суттєво відрізняється від більшості відомих технологічних рішень, що базуються на використанні вакуумних дугових або індукційних переплавів, і відкриває можливості значного спрощення технології виготовлення подібних матеріалів. В результаті досліджень *набули подальшого розвитку підходи і принципи розроблення та одержання високоентропійних сплавів зі зменшеною густиною та вмістом алюмінію 5-50% ат. з температурою плавлення нижче 1000 °C. Зокрема, методом плавлення в печі опору було одержано еквіатомний високоентропійний сплав системи Al–Si–Cu–Ni–Zn з температурою плавлення порядку 925 °C, що свідчить про технологічну простоту і високу економічну привабливість процесу.*

- Показано можливість отримання сплавів з високим вмістом алюмінію без наявності інтерметалідних фаз та міжзеренних сегрегацій шляхом оптимізації співвідношення міді та кобальту. Запропоноване пояснення ролі концентрації валентних електронів у стабілізації твердих розчинів виглядає достатньо аргументованим і добре узгоджується із сучасними уявленнями про принципи дизайну високоентропійних матеріалів. *Вперше показано, що при вмісті алюмінію 20% ат. можливе формування фазового складу сплавів системи Al–Cr–Mn–Fe–Co–Ni–Cu без інтерметалідної складової та міжзеренних сегрегацій і показано, що на це значною мірою впливає зниження вмісту міді до ~5% ат. і додавання до ~10% ат. кобальту, які за рахунок збільшення концентрації валентних електронів сприяють стабілізації твердих розчинів.*

- Показано, що збільшення концентрації алюмінію за відповідного співвідношення інших компонентів може позитивно впливати на формування захисних оксидних плівок та забезпечувати підвищення корозійної стійкості, у тому числі – за одночасного зменшення вмісту хрому. *Вперше проведено*

дослідження корозійної стійкості високо- та середньоентропійних сплавів систем Al–Si–Cu–Ni–Zn та Al–Cr–Mn–Fe–Co–Ni–Cu в різних корозійних середовищах і показано, на прикладі сплавів $Al_5Cr_{20}Mn_{17}Fe_{17}Co_{14}Ni_{17}Cu_{10}$ та $Al_{20}Cr_{15}Mn_{20}Fe_{20}Co_{10}Ni_{10}Cu_5$, що підвищення вмісту алюмінію навіть при зниженні вмісту хрому здатне зменшити мінімум на 20-30% показники втрати маси зразків.

- Слід відзначити результати дослідження взаємодії твердих високоентропійних і середньоентропійних сплавів із розплавом алюмінію. Цей напрям досліджень є новим, тому отримані результати мають безперечну наукову та практичну цінність. Вперше проведено оцінку можливостей одержання з'єднань між високо- та середньоентропійними сплавами і алюмінієм за умов, коли BEC/CEC знаходиться у твердому стані і взаємодіє з рідким алюмінієм. Показано, що ключову роль у формуванні з'єднань відіграє хімічний склад сплаву і час контакту між твердою вставкою та алюмінієвим розплавом за умов початкової температури останнього не нижче 720 °C, що призводить до формування щільного рівномірного шару з інтерметалідів на основі Al_3Fe , щільність формування якого падає зі збільшенням концентрації алюмінію у BEC/CEC.

Таким чином, можна констатувати, що обґрунтованість наукових положень, достовірність експериментальних результатів та рівень наукової новизни дисертаційної роботи не викликають сумнівів. Основні положення дисертації базуються на достатньому обсязі експериментальних досліджень, підтверджені використанням сучасних методів аналізу, характеризуються внутрішньою логічною узгодженістю та становлять вагомий внесок у розвиток наукових основ створення алюмінійвмісних високоентропійних і середньоентропійних ливарних сплавів.

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

Дисертаційна робота Ліхацького І.Ф. за своїм змістом є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому послідовно вирішено актуальне

науково-прикладне завдання, що полягає у встановленні закономірностей формування структурно-фазового стану, механічних, технологічних та корозійних властивостей ливарних високоентропійних і середньоентропійних сплавів з підвищеним вмістом алюмінію, а також у розробленні наукових підходів до проєктування нових багатокомпонентних матеріалів із заданим комплексом експлуатаційних характеристик.

Структура дисертації є логічною та відповідає меті й поставленим завданням дослідження. Робота викладане на 174 сторінках, складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку. Окремі структурні елементи дисертації логічно пов'язані між собою, а викладення матеріалу характеризується послідовністю та узгодженістю.

Перший розділ містить достатньо повний аналіз сучасного стану проблеми, критичний огляд наукових публікацій та обґрунтування вибору напрямку досліджень. Другий розділ присвячений опису використаних матеріалів, методик експериментальних досліджень та обладнання, що забезпечує відтворюваність отриманих результатів. У третьому, четвертому та п'ятому розділах наведено основні результати власних досліджень автора, виконано їх ґрунтовний аналіз та наукове узагальнення, а сформульовані наприкінці кожного розділу висновки логічно впливають із наведених експериментальних даних. Це свідчить про завершеність дослідження.

Під час ознайомлення з дисертацією не виявлено ознак компілятивного характеру дослідження або некоректного використання результатів інших авторів. Виклад матеріалу здійснено у науковому стилі із належним посиланням на використані літературні джерела. Результати власних досліджень чітко відокремлено від відомих наукових положень, а всі запозичені відомості супроводжуються відповідними бібліографічними посиланнями. Представлені у дисертації результати узгоджуються зі змістом опублікованих наукових праць здобувача, що підтверджує їх апробацію та послідовність виконання досліджень.

Ознак порушення принципів академічної доброчесності під час аналізу дисертаційної роботи не встановлено.

Зміст дисертаційної роботи Ліхацького І.Ф. повною мірою відповідає вимогам Стандарту вищої освіти за спеціальністю 136 – «Металургія» та напрямам досліджень, визначеним в освітньо-науковій програмі галузі знань 13 – «Механічна інженерія». Робота охоплює актуальні науково-прикладні завдання з розробки та нових високоентропійних сплавів, які мають знижену густину, високу корозійну стійкість і які можливо одержувати ливарними способами.

Мова та стиль викладення результатів.

Мова дисертації Ліхацького І.Ф. загалом є науковою і відповідає профілю роботи. Автор використовує термінологію, прийняту у фізико-хімії сплавів, металургії та матеріалознавстві. Усі розділи роботи логічно пов'язані між собою та відображають етапи реалізації поставлених завдань.

Дисертаційна робота структурована відповідно до вимог чинного нормативного документу – наказу МОН України від 12.01.2017 № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій». Загальний обсяг становить 140 сторінок та включає вступ, чотири змістовні розділи, висновки, список використаних джерел і додатки. Структура і зміст роботи свідчать про належний рівень академічної культури та відповідність формальним вимогам до дисертаційної праці.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Основні результати дисертації опубліковані у 5 наукових працях у фахових журналах, у тому числі в одній статті, що індексується у Scopus та Web of Science Core Collection. Крім того, автор має 4 публікації у матеріалах міжнародних конференцій.

Тематика опублікованих праць відповідає основному змісту дисертації. Публікації охоплюють сучасні підходи до створення сплавів зі зниженою густиною, високоентропійних і середньоентропійних сплавів з високим вмістом алюмінію, нових ливарних сплавів, технологію виплавки металевих матеріалів, формування структурно-фазових складових сплавів та результати дослідження конкретних експериментальних систем.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Незважаючи на високий науковий рівень дисертаційної роботи, в процесі ознайомлення з її матеріалами виникли окремі зауваження та побажання, які не знижують загальної позитивної оцінки роботи, але можуть бути враховані автором у подальших дослідженнях:

1. Одним із найбільш перспективних напрямів сучасного проектування високоентропійних матеріалів є використання термодинамічного моделювання із застосуванням методу CALPHAD. В дисертації для вибору складів сплавів використано сучасні емпіричні критерії прогнозування фазоутворення (конфігураційна ентропія, ентальпія змішування, різниця атомних радіусів, параметр Ω , концентрація валентних електронів тощо), однак результати могли б бути додатково підсилені проведенням розрахунків фазових рівноваг та прогнозуванням еволюції фазового складу із використанням сучасних CALPHAD-баз даних.

2. Під час аналізу механічних властивостей основна увага приділена визначенню мікротвердості та міцнісних характеристик. Разом із тим для повнішої оцінки перспективності запропонованих сплавів доцільним було б доповнити дослідження визначенням тріщиностійкості або ударної в'язкості, особливо з огляду на можливість використання цих матеріалів у відповідальних деталях машинобудування.

3. Автором детально досліджено вплив хімічного складу на формування структури, фазового складу та властивостей сплавів. Водночас недостатньо уваги приділено впливу технологічних параметрів лиття, насамперед – швидкості охолодження, які можуть істотно змінювати морфологію дендритної структури, ступінь ліквідації та розподіл вторинних фаз. Розширення досліджень у цьому напрямі дозволило б більш повно встановити закономірності структуроутворення в досліджуваних системах.

4. У роботі наведено результати дослідження корозійної стійкості нових сплавів у різних середовищах, проте механізми формування захисних оксидних плівок та роль окремих компонентів у пасивації поверхні розглянуті переважно

на основі літературних даних. Використання методів дослідження поверхні, зокрема рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (XPS) або просвічувальної електронної мікроскопії тонких оксидних шарів, дозволило б значно поглибити інтерпретацію отриманих результатів.

5. У дисертації переконливо продемонстровано можливість одержання нових алюмінійвмісних високоентропійних та середньоентропійних сплавів традиційними ливарними методами. Разом із тим практична цінність роботи була б ще вищою за наявності розширеної техніко-економічної оцінки запропонованих складів порівняно з існуючими конструкційними матеріалами, зокрема щодо вартості легувальних компонентів та потенційної економічної ефективності їх промислового впровадження.

6. У роботі досить широко досліджено вплив хімічного складу на структуру та властивості сплавів, однак перспективним напрямом подальших досліджень є оцінка стабільності сформованої структури після тривалої експлуатації при підвищених температурах або після різних режимів термічної обробки. Такі дослідження дозволили б оцінити довготривалу працездатність запропонованих матеріалів у реальних умовах експлуатації.

Наведені зауваження мають переважно дискусійний характер і стосуються, насамперед, можливих напрямів подальшого розвитку виконаних досліджень. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, не зменшують наукової новизни, практичної значущості та достовірності отриманих результатів і не ставлять під сумнів обґрунтованість сформульованих автором висновків.

Висновок про дисертаційну роботу.

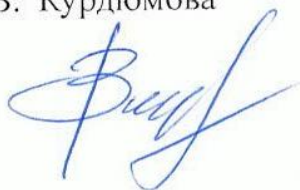
Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Ліхацького Івана Федоровича на тему «Розроблення ливарних високоентропійних сплавів з підвищеним вмістом алюмінію і технологій їх одержання» відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія.

За актуальністю, науковою новизною, ступенем обґрунтованості отриманих результатів та їх практичною значущістю дисертаційна робота повністю відповідає вимогам, визначеним пунктами 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради...», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

З урахуванням викладеного, вважаю, що Ліхацікий Іван Федорович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – «Механічна інженерія» за спеціальністю 136 – «Металургія».

Офіційний опонент:

Старший науковий співробітник відділу
фізики фазових перетворень
Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова
НАН України
канд. фіз.-мат. наук



Віра ФІЛАТОВА

**Підпис канд. фіз.-мат. наук Філатової В.С.
засвідчую:**

Учений секретар
ІМФ ім. Г. В. Курдюмова НАН України
канд. фіз.-мат. наук.



Марина САВЧУК



9 » липня 2026 року