

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію Давидюк Анжели Вікторівни

«Вплив модифікування нанодисперсними композиціями на структуру та властивості ливарних і деформованих алюмінієвих сплавів», подану до захисту на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство

Актуальність теми дисертації

Забезпечення необхідного балансу між механічними, технологічними та експлуатаційними характеристиками конструкційних матеріалів є однією з провідних задач механічної інженерії, що має особливе значення в галузях із підвищеними вимогами до надійності та масогабаритних показників виробів — таких як авіаційна, транспортна, енергетична та ракетно-космічна техніка. Алюмінієві сплави, завдяки поєднанню низької густини, доброї корозійної стійкості та задовільних механічних властивостей, належать до найперспективніших конструкційних матеріалів у цих сферах.

Попри широку номенклатуру як ливарних, так і деформованих алюмінієвих сплавів, що вже використовуються у промисловості, низка їх властивостей — зокрема зварюваність, стабільність структури, міцність і технологічність — досі потребують удосконалення. Це актуалізує дослідження, спрямовані на цілеспрямовану модифікацію структури сплавів з метою покращення їх експлуатаційних характеристик та забезпечення ефективного використання в умовах серійного виробництва.

На сьогодні в Україні розроблено й освоєно широкий асортимент ливарних і деформованих алюмінієвих сплавів систем Al–Si і Al–Mg–Sc. Ливарні силуміни вітчизняного виробництва цінують за високу технологічність, питому міцність і стійкість до корозії; водночас деформовані алюмінієві сплави системи Al–Mg–Sc вирізняються підвищеними пластичністю та міцністю, проте їх зварюваність потребує подальшого вдосконалення.

Актуальність даного дослідження полягає в розв'язанні наступних завдань:

1. **Підвищення довговічності** окремих елементів турбонасосного агрегату, виготовлених із ливарних алюмінієвих сплавів системи Al–Si (марки АЛ4 (АК9ч), АЛ4С), за рахунок покращення структури та механічних властивостей матеріалу, досягнутого шляхом оптимізації технологічних параметрів лиття та термообробки.

2. **Підвищення міцнісних властивостей і зварюваності** деформованого алюмінієвого сплаву системи Al–Mg–Sc (марки 1545) через мікролегування перехідними металами, зокрема скандієм, який виконує роль модифікатора зерен та підвищує корозійну стійкість.

3. **Пошук раціональних методів модифікування** рідкого алюмінієвого розплаву, що забезпечують одержання литих виробів із підвищеною однорідністю структури, щільністю та стабільністю властивостей.

4. **Удосконалення режимів термічної обробки** ливарних виробів для стабілізації їх механічних і технологічних характеристик.

Виконання цих завдань сприятиме створенню ливарних і деформованих алюмінієвих сплавів із комплексом високих експлуатаційних властивостей, що є вкрай важливим для розвитку авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалася у рамках наукових досліджень Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара на кафедрі технології виробництва, кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій за держбюджетними темами: №0120U102240 «Створення та удосконалення комплексу інноваційних технологічних методів та матеріалів для виробів ракетно-космічної авіаційної та оборонної техніки»; №0123U101855 «Створення і удосконалення технологій і матеріалів для ракетних засобів ураження на основі інноваційних конструкторсько-технологічних рішень». Автор є співвиконавцем вказаних держбюджетних тем.

Метою дисертаційної роботи є підвищення технологічних і механічних властивостей ливарних та деформованих алюмінієвих сплавів систем Al–Si і Al–Mg–Sc, призначених для виготовлення виробів ракетно-космічної техніки, шляхом вивчення та врахування закономірностей формування їх структури і властивостей під час модифікування нанодисперсними комплексами.

Наукова новизна отриманих автором результатів

1. Вперше встановлено, що модифікування розплавів алюмінієвих сплавів систем Al–Si та Al–Mg–Sc нанодисперсними композиціями на основі Mg_2Si і SiC забезпечує зменшення розміру зерен із 280 до 110 мкм та із 200 до 100 мкм (у 2–2,5 разу), а також підвищення міцнісних властивостей сплавів марок АЛ4(АК9ч), АЛ4С і 1545.

2. Вперше запропоновано механізм зміцнення при модифікуванні нанодисперсним карбідом кремнію β -SiC, який поєднує контрольоване зеренне зміцнення з дисперсійним підсиленням завдяки впливу нерозчинних тугоплавких частинок.

3. Доведено, що модифікування сплавів систем Al–Si і Al–Mg–Sc усуває евтектику на границях зерен, сприяє рівномірному розподілу зміцнювальних фаз та забезпечує підвищення комплексу механічних властивостей.

4. Вперше встановлено механізми впливу нанодисперсного модифікатора Mg_2Si і SiC на технологічні та механічні властивості ливарних сплавів АЛ4(АК9ч), АЛ4С і деформованого сплаву 1545, що базуються на контрольованому зеренному зміцненні з істотним внеском дисперсійного підсилення.

Проведений аналіз та оцінка новизни й достовірності наукових результатів підтверджують повну відповідність досягнутих результатів заявленій меті дисертаційного дослідження. Розроблені методи модифікування розплавів і оптимізації режимів термічної обробки забезпечують комплексне поліпшення технологічних і механічних властивостей алюмінієвих сплавів, що має суттєве практичне значення для виготовлення деталей ракетно-космічної техніки. Здобувачка продемонструвала ґрунтовне володіння сучасними методами дослідження структури та властивостей металевих матеріалів.

Практичне значення одержаних результатів

1. Розроблено метод комплексного наномодифікування ливарних алюмінієвих сплавів із використанням нанопорошків Mg_2Si і SiC розміром 50–100 нм. Запропонований спосіб забезпечує дрібнозернисту структуру відливок і сприяє підвищенню їх механічних та технологічних властивостей.

2. Встановлено оптимальні технологічні режими модифікування, серед яких — введення термочасової обробки розплаву при 750 °C протягом 10 хвилин. Ці параметри гарантують однорідне розподілення нанодисперсних частинок і стабільність одержаних характеристик сплавів.

3. Створено й впроваджено технологічні інструкції з приготування модифікованих сплавів марок АЛ4 і 1545 на підприємстві машинобудівної галузі. Запровадження цих документів у серійному виробництві дозволило отримати дослідно-промислові партії виливків із покращеним комплексом властивостей.

4. Удосконалено режим термічної обробки заготовок із модифікованих сплавів АК9ч, АЛ4С і 1545. Скорочено тривалість загартування та старіння без зниження, а в ряді випадків із підвищенням, показників міцності й пластичності.

5. Інтегровано результати дослідження у освітній процес, зокрема до профільних дисциплін із матеріалознавства. Використання дисертаційних напрацювань при викладанні дисциплін «Технологія обробки спеціальних матеріалів», «Корозія сплавів авіаційно-космічної техніки», «Наноматеріали і нанотехнології» та інших підвищує якість підготовки бакалаврів і магістрів спеціальності 132 «Матеріалознавство».

Отже, практичне значення дисертаційної роботи полягає в розробці науково обґрунтованих технологічних підходів до модифікування алюмінієвих сплавів, які дозволяють одержувати вироби з підвищеними структурно-механічними та технологічними характеристиками. Впроваджені методи й інструкції сприяють підвищенню ефективності виробництва й якості кінцевої продукції в ракетно-космічній та суміжних галузях машинобудування, а також забезпечують оновлення навчальних програм матеріалознавчих дисциплін.

Ступінь обґрунтованості сформульованих наукових положень та достовірність висновків забезпечується за рахунок:

1. Використання стандартизованого експериментального обладнання провідних дослідницьких установ (ДП «ВО Південний машинобудівний завод ім. О. М. Макарова», Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара) і застосування комплексного набору методів для вивчення хімічних, фізичних, технологічних та механічних властивостей сплавів, а також структурно-фазових перетворень. Інтерпретація результатів випробувань узгоджується з сучасними теоретичними уявленнями в матеріалознавстві алюмінієвих сплавів.

2. Опублікування результатів у рецензованих фахових виданнях України та закордонних наукових журналах, що підтверджує актуальність і якість виконаних досліджень.

3. Апробація наукових результатів на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конгресах і конференціях, де дискусія і обговорення з колегами дозволили уточнити методологічні підходи та отримані висновки.

4. Впровадження результатів в освітній процес фізико-технічного факультету ДНУ — розроблені методики та рекомендації застосовуються при викладанні профільних дисциплін, а також підготовці магістрів та бакалаврів спеціальності 132 «Матеріалознавство».

Комплексність підходу — від строгого експериментального контролю до широкої наукової дискусії та освітньої імплементації — гарантує високий рівень обґрунтованості наукових положень і достовірності висновків дисертаційної роботи.

Аналіз змісту дисертації

Дисертаційна робота побудована за класичною схемою: анотація, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і п'ять додатків. Загальний обсяг становить 161 сторінку, з яких основна частина налічує 112 сторінок. Список літератури включає 107 найменувань.

У **першому розділі** наведено ґрунтовний огляд сучасних досліджень ливарних і деформованих алюмінієвих сплавів у контексті ракетно-космічної техніки. Автор здійснює класифікацію сплавів, охоплює їх фізико-хімічні та технологічні властивості й аналізує області застосування, зокрема перспективні композитні матеріали та зварні конструкції. Особливу увагу приділено дослідженню діаграм стану ключових систем, впливу легувальних елементів на мікроструктуру та методів підвищення експлуатаційних характеристик. Акцент зроблено на зниженні масогабаритних показників, оптимізації собівартості та підвищенні надійності виробів, що підкреслює наукову та практичну важливість теми. Огляд літератури утворює міцну методологічну основу для подальших експериментальних розділів дисертації. Проаналізовано існуючі технології модифікування сплавів із вказанням їхніх переваг і обмежень, а також описано теоретичні механізми впливу наномодифікаторів на структуру і властивості алюмінієвих сплавів. Логічна послідовність викладу, наявність ілюстративного матеріалу та глибоке осмислення автором сучасного стану проблеми свідчать про високий науковий рівень першого розділу.

Другий розділ присвячено експериментальній базі дослідження ливарних сплавів АК9ч та АЛ4С (системи Al–Si) і деформованого сплаву 1545 (системи Al–Mg–Sc), що застосовуються для виготовлення крильчаток турбонасосних агрегатів ракетних двигунів. Автор чітко окреслює хімічний склад усіх зразків і обґрунтовує вибір саме цих матеріалів з огляду на їхню технологічність та експлуатаційну надійність. Особливу увагу приділено розробці комплексного наномодифікатора на основі Mg_2Si і SiC , синтезованого плазмохімічним методом, — обґрунтовано склад і розміри часток, що забезпечують оптимальне дисперсійне зміцнення. Методична частина викладена послідовно й детально. Для дослідження мікроструктури застосовано оптичну мікроскопію; фазовий склад аналізовано методом рентгеноструктурного аналізу; механічні властивості оцінювалися через випробування на розтяг, вимір ударної в'язкості, твердість за Брінеллем та мікротвердість; технологічні параметри — рідинотекучість, усадку,

газовміст та схильність до гарячотріщинності. Окремий розділ присвячено дослідженню корозійної стійкості: визначали міжкристалітну та ризику розшарування, а також корозійне розтріскування в агресивних середовищах. В кінці розділу наведено технічні характеристики промислового обладнання для виплавки та термічної обробки сплавів. Узагальнені висновки підтверджують адекватність обраних методів і їх повну відповідність цілям дисертаційного дослідження.

Третій розділ обґрунтовує вибір комплексного наномодифікатора на основі Mg_2Si і SiC та демонструє механізм його дії на структуру й властивості алюмінієвих сплавів. На початку розділу наведено всебічний аналіз кристалогенної та розмірної відповідності наночастинок модифікатора до матриці Al , що визначає високу ефективність зародження кристалів на їх поверхні. Обрані Mg_2Si і SiC відзначаються тугоплавкістю, нерозчинністю в розплаві та близькою до $\alpha-Al$ кристалічною структурою, що забезпечує стабільну дисперсію й мінімізацію агрегації в ході введення. Далі розділ деталізує розроблений технологічний процес: виготовлення таблетованого комплексного наномодифікатора, його склад (доля Mg_2Si і SiC) та режим термочасової обробки розплаву. Запропоновано оптимальні параметри—температуру введення, час витримки та швидкість перемішування—які забезпечують рівномірний розподіл наночастинок у рідкому металі та формування дрібнозернистої структури виливків. Механізм впливу модифікатора розкрито через призму контролю процесу кристалізації: підвищення температури початку кристалізації, збільшення кількості центрів зародження нових зерен, реалізація дисперсійного зміцнення за рахунок нерозчинних наночастинок. Здобувачка формулює модель утворення $\alpha-Al$ твердого розчину на поверхні наночастинок, що логічно пояснює спостережувані зменшення величини усадкової раковини та рівномірний розподіл мікропористості. Узагальнений висновок розділу підтверджує, що оптимальне введення наномодифікатора дозволяє істотно покращити механічні характеристики алюмінієвих сплавів за рахунок дрібнозернистого зміцнення та контролю структурно-фазових перетворень.

Четвертий розділ присвячено експериментальному вивченню впливу запропонованого комплексного наномодифікатора ($Mg_2Si + SiC$) на технологічні властивості й структуру алюмінієвих сплавів АК9ч, АЛ4С та сплаву 1545. У першій частині розділу виконано порівняльний аналіз ключових технологічних характеристик до та після модифікування: рідкотекучості, схильності до утворення гарячих тріщин, газового вмісту й герметичності. Експериментальні дані свідчать про поліпшення рідкотекучості розплаву та зниження газової пористості в усіх досліджуваних сплавах, що забезпечує підвищену якість литих відливків і зменшує ймовірність дефектів при серійному виробництві. У другій частині розділу проведено детальний металографічний і рентгеноструктурний аналіз мікроструктури. Оптична та сканувальна мікроскопія підтвердила значне подрібнення зерен $\alpha-Al$ після введення наномодифікатора, а рентгеноструктурний аналіз виявив у сплаві АК9ч фази $\beta-SiC$, Mg_2Si та інші інтерметалідні сполуки, що входять до складу модифікатора. Аналогічні зміни зареєстровано й у сплаві 1545 — зерна стали меншими та одноріднішими,

легувальні елементи й інтерметалідні фази розподілилися рівномірніше. Отримані результати підтверджують ефективну взаємодію наномодифікатора з алюмінієвим розплавом, що призводить до стабілізації структури та утворення дрібнодисперсних зміцнювальних фаз. Це в цілому забезпечує підвищення технологічних і механічних властивостей ливарних і деформованих алюмінієвих сплавів.

У п'ятому розділі викладено розроблений технологічний процес отримання модифікованих алюмінієвих сплавів АК9ч, АЛ4С і 1545 із застосуванням наноконпозиції $Mg_2Si + SiC$. Оптимізовано режими термо-зміцнювальної обробки: для ливарного сплаву АК9ч запропоновано двоступеневе старіння, яке скорочує тривалість процедури та одночасно підвищує межі міцності й пластичність; для деформованого сплаву 1545 визначено параметри загартування й старіння, що сприяють дрібнозернистому зміцненню матриці. Окремо досліджено зварюваність сплаву 1545 після модифікування: результати показали високі показники міцності та в'язкості зварного шва. Промислова апробація підтвердила ефективність розробленої технології: модифіковані сплави продемонстрували статистично значуще підвищення границь текучості й міцності, твердості за Брінеллем та ударної в'язкості. Встановлено оптимальну концентрацію наномодифікатора та з'ясовано механізми зміцнення — дисперсійне й зеренне. Попередні дослідження корозійної стійкості свідчать про надійність сплавів у агресивних середовищах, що розширює їх сферу відповідального застосування.

Структура та зміст дисертаційної роботи повністю відповідають поставленій меті й завданням дослідження. Виклад висновків до кожного розділу забезпечує логічну послідовність та повноту аргументації, а узагальнені висновки демонструють науковий та практичний внесок здобувачки за спеціальністю 132 «Матеріалознавство» і підтверджують оволодіння методологією сучасних досліджень у галузі механічної інженерії.

Публікація та апробація основних результатів дисертації

Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 21 наукових роботах: 1 статті в журналі, що індексується в Scopus, 10 статей у наукових фахових виданнях України, 9 збірниках матеріалів конференцій, а також в 1 патенті України на корисну модель.

Основні результати дисертаційної роботи були обговорені на: Міжнародних молодіжних науково-практичних конференціях «Людина і Космос» (Дніпро, 2016, 2019, 2022-2024 рр.); Міжнародному форумі студентів, аспірантів і молодих вчених (Дніпро, 2017 р.); Міжнародній конференції «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» (Дніпро-Відень, 2017 р.); Конференції Дніпровська орбіта (Дніпро, 2016 р.); Актуальні напрямки матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів (Харків, 2020 р.); Виклики та проблеми сучасної науки (Дніпро, 2023 р.)

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота Давидюк Анжели Вікторівни написана українською мовою, має змістовну цілісність та послідовність.

Дисертаційну роботу оформлено відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. №40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

За результатами аналізу дисертаційної роботи та публікацій автора порушення академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в роботі відсутні, про що свідчить висновок перевірки на плагіат за допомогою спеціалізованої програми StrikePlagiarism.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Давидюк Анжели Вікторівни є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації та плагіату. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Зауваження до дисертації

1. Щодо методики зварювання у розділі 5.4 (стор. 110):

У розділі 5.4 розглядається зварюваність сплаву 1545, однак відсутні дані щодо застосованої методики зварювання. Зважаючи на суттєвий вплив способу та параметрів зварювання на якість з'єднання, доцільно було вказати спосіб зварювання, а також ключові параметри режиму зварювання (струм, напруга, швидкість подачі, тип захисного середовища тощо), що забезпечило б можливість кращої інтерпретації результатів і реплікації.

2. Щодо методологічного обґрунтування у розділі 2:

У розділі «Методи дослідження» спостерігається недостатнє обґрунтування вибору застосованих методів. У науковому дослідженні важливо не лише зазначити використані методи, а й пояснити, чому саме ці методи є релевантними для розв'язання поставлених задач. Доцільно було б розширити пояснення вибору методичного апарату з позицій його адекватності меті та завданням дослідження.

3. Щодо вибору параметрів термочасової обробки у розділі 4 (стор. 90):

У розділі 4 при виборі часу витримки 10 хв за температури 750°C здобувачка зазначає, що це сприяє рівномірному розподілу модифікатора в об'ємі розплаву. Проте не розглянуто доцільність застосування коротшого інтервалу, наприклад 5 хв, що могло б покращити енергоефективність і продуктивність процесу. Доцільно було б надати порівняльне обґрунтування обраного режиму обробки або зазначити причини, з яких альтернативні варіанти були відхилені.

Узагальнюючи викладене, наведені зауваження стосуються окремих аспектів обґрунтування та повноти викладення дослідження, однак не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Отримані наукові та прикладні результати є вагомим внеском у розвиток галузі, а зауваження мають на меті підвищення рівня наукової аргументації та чіткості подачі матеріалу.

Загальні висновки

Вважаю, що дисертаційну роботу здобувачки ступеня доктора філософії Давидюк Анжели Вікторівни «Вплив модифікування нанодисперсними композиціями на структуру та властивості ливарних і деформованих

алюмінієвих сплавів» виконано на високому науковому рівні. Робота є завершеним науковим дослідженням, результати якого мають теоретичну та практичну цінність і спрямовані на розв'язання комплексної наукової задачі, що має важливе значення для розвитку галузі знань «Механічна інженерія». Зміст дисертації не суперечить принципам академічної доброчесності, а її актуальність, наукова новизна та практична цінність відповідають вимогам, визначеним пунктами 6–9 «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 року № 44.

Здобувачка Давидюк Анжела Вікторівна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

Рецензент:

кандидат технічних наук,
доцент кафедри ракетно-космічних
та інноваційних технологій
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара



Юрій ТКАЧОВ

*Підпис доцента Юрія ТКАЧОВА
засвідчую:*

Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара,
кандидат біологічних наук, доцент



Олег МАРЕНКОВ