

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Тьомкіна Дмитра Олександровича

на тему «Удосконалення технологічного процесу виготовлення литих робочих лопаток з жароміцних нікелевих сплавів для забезпечення експлуатаційних властивостей турбіни низького тиску»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

в галузі знань **13 Механічна інженерія**

за спеціальністю **136 Металургія**

Актуальність теми дисертації

Дисертаційне дослідження Тьомкіна Дмитра Олександровича за темою «Удосконалення технологічного процесу виготовлення литих робочих лопаток з жароміцних нікелевих сплавів для забезпечення експлуатаційних властивостей турбіни низького тиску» є надзвичайно актуальним у контексті потреб сучасного авіаційного і енергетичного машинобудування. В умовах високих теплових і механічних навантажень, яким піддаються лопатки газотурбінних установок (ГТУ) та авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), питання підвищення їхньої довговічності й надійності набуває стратегічного значення. Особливо це стосується ливарних жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС), які широко використовуються у виготовленні деталей турбін. Дисертант обґрунтовано акцентує увагу на технологіях комплексного легування, модифікування та високотемпературної обробки розплаву (ВТОР) як ефективних засобах керування структуроутворенням. Комплексний підхід, що включає легування сплаву гафнієм, ніобієм, модифікування ітрієм і вплив температурного режиму плавки, є перспективним шляхом підвищення експлуатаційних характеристик литих виробів.

У роботі враховано як потреби реального виробництва (АТ "МОТОР СІЧ"), так і сучасні напрями наукових досліджень, що свідчить про глибоку прикладну й теоретичну актуальність теми.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів, їх достовірності та новизни

Наукова новизна отриманих результатів дисертації полягає в наступному:

1. Вперше систематизовано та узагальнено відомості щодо впливу сумарного вмісту (Ti+Al) на зміцнювальну γ' -фазу в ЖНС з різними типами зміцнення. Уточнено граничну межу легування сумою елементів (Ti+Al). Металографічними дослідженнями встановлено, що за суми $Ti+Al \geq 8,2 \%$ у структурі сплаву формуються грубі границі зерен, по яких виділяються евтектичні фази, в результаті відбувається зменшення часу до руйнування при випробуванні на тривалу міцність. При введенні в розплав $0,136 \%$

нікель-ітрієвої лігатури забезпечує формування тонких меж зерен практично без виділень знеміцнюючих фаз.

2. Вперше розрахунками встановлено, що для проведення реакції карбідоутворення ітрію 0,015 мас.% при гафнії 0,25 мас.% достатньо 0,02 мас.% вуглецю. Додавання 0,15...0,25 мас.% гафнії до ЖСЗДК-ВІ формує глобулярні карбіди по межах зерен. Вірогідно первинні карбіди ітрію формуються з розплаву і сприяють зростанню глобулярних карбідів типу MeC . Отриманої за розрахунками кількості ітрію і гафнії, є достатнім для утворення тільки глобулярних карбідів у сплаві ЖСЗДК-ВІ за умови зменшення кількості вуглецю.

3. Отримано подальший розвиток уявлення про процес утворення високотемпературних карбідів ніобію, гафнії і титану. Показано, що при вмісті вуглецю 0,06 мас.% і нижче, буде визначатися дефіцит вуглецю, а отже, легуючі елементи витрачалися на зміцнення структури сплаву, а саме:

- гафній перешкоджає руйнуванню меж зерен за рахунок пригнічення виділення вторинних карбідів, і входить в γ' -фазу;
- ніобій додатково легує γ' -фазу;
- титан додатково утворює γ' -фазу.

Наукові результати дисертації ґрунтуються на детальному аналізі структурних трансформацій ливарних ЖНС серії дослідних плавок, а також отриманих механічних властивостей литого металу. Достовірність висновків підтверджується узгодженістю експериментальних даних з теоретичними розрахунками (КРАМ, стехіометричних рівнянь карбідоутворення) та результатами промислових випробувань, зокрема на підприємстві ВП "ЗМЗ". Новизна дослідження та його практична значущість полягають у вперше запропонованому технологічному комплексному впливі $[Y+Nb+Hf+V]$, що дозволив збільшити ударну в'язкість у 2 рази та довговічність деталей у 4 рази порівняно з базовим варіантом. На прикладі розробленого технологічного комплексного впливу $[Y+Nb+Hf+V]$ встановлено граничні концентрації легуючих і модифікуючих добавок для досягнення бажаних морфологій фаз. Також уточнено роль легування в умовах вуглецевого дефіциту, що істотно доповнює існуючі уявлення про зміцнення ЖНС.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності. Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота Тьомкіна Дмитра Олександровича написана державною мовою України.

Дисертаційна робота вирізняється логічною структурою, чітко окресленою науковою метою та послідовним вирішенням поставлених завдань. Кожний розділ узгоджений зі змістом попереднього і логічно підводить до загальних висновків. Робота охоплює повний цикл: від обґрунтування теоретичних передумов, постановки експериментів, до практичних рекомендацій та впровадження на виробництві. Матеріал дослідницької роботи ретельно задокументований і представлений, за

структурою дисертація складається зі вступу, 4 розділів дослідження, загальних висновків, списку джерел і додатку. Загальний обсяг дисертації становить 145 сторінок, зокрема: основного тексту дисертації 126 сторінок, 19 рисунків, 31 таблиця, 1 додаток та перелік використаних літературних джерел із 160 бібліографічних найменувань.

Принципи академічної доброчесності дотримані: наведено всі необхідні джерела, зазначено власний внесок здобувача, експериментальні методики детально описані. Практичні результати апробовані в умовах підприємства, що додатково підтверджує завершеність і обґрунтованість наукової роботи.

Вступ.

Мова вступу є науковою, логічною та чіткою. Використано фахову термінологію без надмірної наукової важкості. Автор влучно формулює проблему: необхідність удосконалення технології лиття жароміцних нікелевих сплавів для підвищення надійності лопаток турбін. Розкрито як загальну актуальність теми, так і конкретне обґрунтування потреби в дослідженні сплаві ЖСЗДК-VI. Добре структуроване виклад мети, завдань, об'єкту та предмету дослідження. Вступ належно обґрунтовує вибір напрямів: легування Nb, Hf, Y та застосування ВТОР. У підсумку, мова та стиль вступу забезпечують високий рівень зрозумілості та інформативності як для фахівців, так і для рецензентів та опонентів.

Розділ 1. Ливарні жароміцні нікелеві сплави, що застосовуються для виготовлення деталей газотурбінних двигунів.

Цей оглядовий розділ написаний в академічному стилі з чіткою логічною структурою. Кожен підрозділ присвячений окремим аспектам таких як: принципи роботи ГТУ та ГТД, умови експлуатації робочих лопаток турбіни низького тиску, вимоги до матеріалу робочих лопаток, сплави, що застосовуються та технології лиття, які використовуються для виготовлення турбінних лопаток, вплив легувальних елементів на фазовий склад сплаву, основні методики, що дозволяють прогнозувати структурну стабільність і збалансованість хімічного складу ливарних ЖНС. Виклад є лаконічним, логічним, термінологічно точним. У підрозділах 1.3.1–1.3.8 докладно описано вплив кожного легуючого та модифікуючого елементу, що формує основу обґрунтування теми. Автор послідовно демонструє ерудицію в галузі та вміння оперувати літературними даними.

Аналітичний огляд літератури дозволив зробити висновок, що для підвищення експлуатаційних властивостей робочих лопаток необхідно використовувати комплексний підхід технологій, спрямований на вдосконалення структури і властивостей ливарних ЖНС.

Розділ 2. Матеріали та методика досліджень.

Розділ має детально описовий, проте технологічно чіткий стиль. Використано багато технологічної лексики: “лігатура”, “гомогенізація”, “експрес-аналізатор”, що робить текст фахово насиченим. Автор чітко виокремлює дослідні серії заливання зразків, вказує параметри плавок, умови випробувань, використовувані прилади, технології модифікування і модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ. Наведено технологічний процес комплексного модифікування розплаву з додаванням ітрію, ніобію та церію, включаючи поверхневу обробку інокулятором при заливці в дослідну керамічну форму, а також процес модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ шляхом легування гафнієм і ніобієм, модифікуванням ітрієм та проведення ВТОР. Загалом, цей розділ написаний у практичному стилі, що повністю відповідає його меті – сформулювати чітке розуміння методики, придатної для відтворення або повторення.

Розділ 3. Вивчення впливу ітрію на властивості ливарного жароміцного нікелевого сплаву.

Стиль цього розділу наближається до аналітичного. В тексті багато математично-логічних конструкцій (“лінійна залежність”, “коефіцієнт детермінації R^2 ”). Розділ побудований на комбінації теоретичного аналізу та емпіричних результатів. Здобувач наводить узагальнення та класифікацію впливу вмісту титану та алюмінію ($Ti+Al$) на процес утворення зміцнювальної γ' -фази в ЖНС з різними механізмами зміцнення. Автор узагальнює тенденції стану меж зерен, пов’язані з легуванням Y , та порівнює дослідні варіанти з модифікуванням і без. Виконані розрахунки структурної стабільності демонструють, що при вмісті ($Ti+Al$) більше 8,2% на межі зерен формується евтектична фаза, а при сумарній концентрації ($Cr+W+Mo$) від 20,8% і вище, прогнозується поява ТЩУ фаз, що, ймовірно, сприяє зменшенню тривалої міцності сплаву.

Мова ясна, передбачає володіння фаховим апаратом. Автор уникає зайвих повторів, вдало використовує структуру “теза – підтвердження – висновок”.

Розділ 4. Розробка модернізованого сплаву ЖСЗДК-ВІІ з підвищеними властивостями.

Розділ є основним в роботі й має доказовий стиль. Автор послідовно розкриває вплив запропонованої системи модернізації (авторська термінологія) $[Y+Nb+Hf+ВТОР]$ на макро- і мікроструктуру, механічні властивості, ударну в’язкість та тривалу міцність. Наводить порівняння дослідних процесів технології та результатів модифікування та модернізації сплаву. Результати випробувань зразків, залитих з проведенням модифікування та модернізації, представлені металографічним дослідженням розподілу та формою карбідів, станом меж зерен, а також показниками

міцності та пластичних властивостей матеріалу. Ударна в'язкість при випробуванні зразків комплексної модернізації сплаву в порівнянні з вихідною плавкою сплаву виплавки ВП «ЗМЗ» зростає з 21,7 Дж/см² до 48,3 Дж/см², а час до руйнування при температурі 850 °С і навантаженні 350 МПа збільшився з 150 год. до 671 год. Наведено обґрунтування вибору критеріїв технології та матеріалів, прийнятих для проведення модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ. Здобувач аргументує розрахунками, заснованими на методах КРАМ, РНАСОМР та ін., здатність вихідних плавок до модифікування, легування тощо, і взагалі, до модернізації. З використанням стехіометричних рівнянь утворення карбідів на прикладі варіанту [Y+Nb+Hf+ВТОР] встановлено, що для утворення карбідів ніобію і титану необхідно по 0,06 мас. % вуглецю, в сплаві визначається дефіцит вуглецю, отже, легуючі елементи будуть витрачатися на легування основи і утворення структурних компонентів сплаву.

Опис процесів легування, модифікування та карбідоутворення супроводжується схемами, рисунками та табличними даними, що підтримують якість викладення матеріалу.

Розділ містить рекомендації для практичного застосування у виробництві.

Розділ відзначається високою доказовістю, точністю, узгодженістю викладеного з поставленими цілями.

Загальні висновки.

Мова і стиль викладення загальних висновків дисертації Дмитра Тьомкіна є завершеною науковою систематизацією результатів. Автор дотримується академічної стислості, водночас зберігаючи ясність і послідовність. У кожному пункті вказано конкретний результат, отриманий у процесі дослідження, і підкреслено його практичне або теоретичне значення.

У висновках узагальнено комплексний вплив легування, модифікування та високотемпературної обробки розплаву на формування структури жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ. Автор підсумовує: введення гафнію, ніобію та ітрію сприяє утворенню стабільної γ' -фази, зміні морфології карбідів, очищенню меж зерен, підвищенню однорідності структури. Доведено, що технологічний підхід [Y+Nb+Hf+ВТОР] забезпечує зростання ударної в'язкості у 2 рази та часу до руйнування при тривалих навантаженнях – у 4 рази.

Крім того, автор наголошує на застосуванні теоретичних розрахунків фазової рівноваги та методики КРАМ для проведення легування, що є прикладом поєднання теорії та практики. Висновки добре віддзеркалюють як наукову новизну, так і інженерну доцільність запропонованих рішень. Загальний стиль викладу відповідає критеріям завершеності дисертаційного дослідження.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Результати дисертації знайшли відображення у 7 наукових статтях, з яких 6 опубліковано у фахових журналах України, а 1 входить до наукометричних баз Scopus/WOS. Публікації відображають ключові етапи дослідження: від вивчення впливу ітрію на властивості сплаву ЖС6У-ВІ, аналізу структурної стабільності сплаву ЖСЗДК-ВІ, до апробації комплексної технології [Y+Nb+Hf+ВТОР]. Статті охоплюють як вітчизняні видання, так і міжнародні ресурси, що підтверджує міжнародне визнання результатів. Крім того, дисертант взяв участь у трьох наукових конференціях.

У процесі написання дисертаційної роботи автор керувався нормами наукової доброчесності.

Надані автором результати дослідження ґрунтуються на достовірних джерелах і відображають підсумки самостійно виконаної наукової діяльності.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В тексті роботи використовується словосполучення “модернізація сплаву”, сенс якого, у викладі автора, є дискусійним, адже мова йде про технологічні операції, що пов'язані, фактично, з комплексною обробкою розплаву існуючого сплаву: легуванням, модифікуванням та ВТОР.

2. Перший розділ роботи дещо перевантажений інформацією про вплив хімічних елементів на значущі показники якості ЖНС відносно аналітики щодо ВТОР та ГПП.

3. На рис. 4.2 не наведено і не пояснено форми виділення карбідів в матеріалі різних варіантів дослідних плавок.

4. У рекомендаціях в розділі 4.5.2 бажано було б більш докладно деталізувати дані про час і температуру ведення процесу виплавки сплаву ЖСЗДК-ВІ.

5. В додатку А не надано повних умов проведення випробувань дослідних зразків на АТ «МОТОР СІЧ».

6. В тексті дисертації мають місце орфографічні та стилістичні помилки і неточності. В деяких випадках використовується занадто «виробнича» термінологія.

Висловлені зауваження не є критично важливими і не применшують загальної значущості прикладних аспектів і наукової оригінальності досягнутих результатів, а також не змінюють в цілому позитивного сприйняття дисертаційної роботи, поданої для здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертаційна робота Тьомкіна Дмитра Олександровича є завершеним самостійним науковим дослідженням, яке відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії у галузі “Металургія”. Здобувач продемонстрував глибоке володіння сучасними методами дослідження,

технологіями модифікування і легування жароміцних нікелевих сплавів. Представлена розроблена комплексна технологія, що має як теоретичне, так і промислове значення, є придатною до впровадження. Матеріали дисертації свідчать про наявність у здобувача аналітичного мислення, здатності до узагальнення та формулювання обґрунтованих висновків. Результати оприлюднені у фахових виданнях, пройшли апробацію на наукових конференціях і мають визнання у виробничих умовах.

Дисертаційна робота здобувача відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.п. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

Робота заслуговує на схвальну оцінку, а її автор Тьомкін Дмитро Олександрович – на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 – Металургія.

Офіційний опонент:

Декан факультету
електромеханіки та електromеталургії
Українського державного університету
науки і технологій
Доктор технічних наук, професор

Вадим СЕЛІВЬОРСТОВ

Підпис Селівьорстова В.Ю. засвідчую
Провідний фахівець відділу кадрів УДУНТ

Володимир ШИФРІН

