

РЕЦЕНЗІЯ

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

Сучасній промисловості, для зміцнення економічного потенціалу України потрібні газотурбінні двигуни для авіації, установок наземного і морського використання, які будуть мати в експлуатації: підвищений міжремонтний ресурс, високу надійність і економічність. Забезпечення необхідних характеристик двигунів можливе при використанні сучасних технологій виробництва деталей, отримання жароміцних матеріалів з поліпшеними властивостями. У даний час прогрес у галузі сучасного двигунобудування стримується характеристиками жароміцних матеріалів, серед яких основне місце відводиться сплавам на основі нікелю.

Традиційні методи поліпшення експлуатаційних властивостей нікелевих сплавів з рівноосною структурою практично не виправдують себе. Так, збільшення концентрації легуючих елементів може призводити до огрубіння меж зерен та утворення ТЩУ фаз.

У зв'язку з цим, розробка і впровадження нових способів отримання жароміцних сплавів з високими міцнісними та експлуатаційними властивостями, що дозволяють зберігати працездатність деталей під впливом високих температур і навантажень, є актуальною інноваційно-інженерною задачею.

Основні дослідження повинні бути спрямовані на формування зерен сприятливих розмірів, вдосконалення меж зерен і структури сплаву в цілому.

На підставі вищевикладеного, роботи, орієнтовані на створення прогресивних методів виробництва критично навантажених компонентів газотурбінних двигунів і установок, залишаються затребуваними і сприяють вирішенню ключової задачі сучасного двигунобудування — підвищенню експлуатаційних властивостей матеріалів, що застосовуються для деталей гарячого тракту силових агрегатів.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукова новизна результатів дисертації полягає у 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 $0,015 \text{ мас.}\%$ при гафнії $0,25 \text{ мас.}\%$ достатньо $0,02 \text{ мас.}\%$ вуглецю. Додавання $0,15 \dots 0,25 \text{ мас.}\%$ гафнії до ЖСЗДК-VI 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-VI за умови зменшення кількості вуглецю.

3. Отримано подальший розвиток уявлення про процес утворення високотемпературних карбідів ніобію, гафнії і титану. Показано, що при вмісті вуглецю $0,06 \text{ мас.}\%$ 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.

Наукова новизна результатів дослідження чітко визначена та узгоджується з визнаним науковим уявленням.

Висновки, сформульовані здобувачем, мають належне теоретичне й практичне підґрунтя, що підтверджується результатами експериментальних досліджень та промислового випробування.

Ключові результати дисертаційного дослідження були опубліковані у фахових наукових виданнях та презентовані на авторитетних міжнародних наукових конференціях.

Поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання щодо удосконалення технологічного процесу що дозволяє підвищити механічні властивості робочих лопаток турбіни низького тиску виконане в повному обсязі. Отримані результати, рівень проведених досліджень та їх наукове узагальнення засвідчують ґрунтовне опанування здобувачем методологічних засад наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційне дослідження здобувача Тьомкіна Дмитра Олександровича за своїм науковим змістом узгоджується з вимогами освітнього стандарту за спеціальністю 136 «Металургія» галузі знань 13 «Механічна інженерія» та охоплює актуальні напрями досліджень, визначені освітньо-науковою програмою підготовки «Металургія». Представлена робота є завершеним самостійним науковим дослідженням, а отримані результати та сформульовані висновки засвідчують наявність особистого наукового внеску здобувача у розвиток відповідної галузі знань.

Аналіз звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги можна зробити висновок, що кваліфікаційна робота Тьомкіна Дмитра Олександровича є результатом його власних наукових досліджень. У роботі відсутні ознаки фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату, запозичень або несанкціонованого використання здобувачем результатів інших авторів. Застосовані здобувачем теоретичні положення та ідеї, результати та текстові фрагменти, запозичені дисертантом з праць інших дослідників, коректно і належним чином задокументовані шляхом відповідних бібліографічних посилань.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота здобувача написана українською мовою. Дисертаційне дослідження викладено логічно та доступно для сприйняття. Автором використано типову термінологію фахового спрямування, що сприяє належному розкриттю змісту дослідження.

Дисертаційна робота містить у собі: вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних літературних джерел та 1 додаток. Загальний обсяг дисертації становить 145 сторінку, зокрема основного тексту дисертації 126 сторінок, 19 рисунків, 31

таблиця 1 показує та перелік використаних літературних джерел із 160 бібліографічних найменувань.

У вступі, тема дисертації обґрунтована як актуальна, зазначено цілі дослідження, його об'єкт і предмет. Метою роботи є удосконалення технологічного процесу отримання литих робочих лопаток ГТД і ГТУ з жароміцного нікелевого сплаву для забезпечення підвищеного рівня механічних та експлуатаційних властивостей турбіни низького тиску із застосуванням комплексного технологічного впливу, що включає легування, модифікування та інше. Об'єктом дослідження, у роботі є технологічні процеси впливу на структуроутворення ЖНС для забезпечення формування сприятливої структури і забезпечення поліпшених показників механічних властивостей та експлуатаційних характеристик, відповідно до вимог галузевої нормативної документації. Предметом дослідження було обрано структурні характеристики та показники механічних і експлуатаційних властивостей ЖНС після комплексного технологічного впливу на процеси виплавки ливарних сплавів і отримання виливків. У вступі зазначені цілі та шляхи модернізації сплаву. Також у вступі описано зв'язок роботи з науковими програмами; наведено методи дослідження, практична цінність результатів дослідження; зазначено перелік наукових публікацій за напрямом дисертаційного дослідження, а також наукові конференції, на яких повідомлялося про ключові результати дисертаційної роботи.

У першому розділі «Ливарні жароміцні нікелеві сплави, що застосовуються для виготовлення деталей газотурбінних двигунів» розглянуто умови експлуатації робочих лопаток турбіни низького тиску, які використовуються в установках наземного базування та авіаційних двигунах. Визначено шкідливі фактори, які впливають на лопатки в процесі експлуатації. Вказано вимоги до матеріалу робочих лопаток. Описано методи лиття, що використовуються для отримання лопаток турбіни, та застосовувані сплави. Розглянуто вплив хімічних елементів і технологічних прийомів на властивості та структуру ЖНС.

Коротко описано основні методики, що дозволяють прогнозувати структурну стабільність і збалансованість хімічного складу ливарних ЖНС.

Аналітичний огляд літератури дозволив зробити висновок, що для підвищення експлуатаційних властивостей робочих лопаток необхідно використовувати комплексний підхід, що полягає в легуванні, об'ємному і поверхневому модифікуванні, температурній обробці розплаву (ВТОР) на першу і другу точки рівноважного стану ливарних ЖНС, і гарячому ізостатичному пресуванні виливків лопаток.

У другому розділі «Матеріали та методика дослідження» представлено матеріали, що використовувалися при реалізації визначеного обсягу досліджень. Наведена технологія

виготовлення керамічних форм: дослідних (для поверхневого модифікування) та серійних для лиття за витоплюваними моделями; технологія виготовлення зразків для дослідження знеміцнення меж зерен ЖНС; технологія виплавлення вихідних плавок жароміцного сплаву; технології модифікування і модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ. Описано технологічний процес об'ємного модифікування жароміцного розплаву ітрієм таніобієм з проведенням поверхневого модифікування, а також технологічний процес модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ, як легування ніобієм, гафнієм, модифікування ітрієм, та проведення ВТОР.

Представлено, що при дослідженні отриманих виливків застосовувалися сучасні засоби аналізу хімічного складу, структури сплавів, а також методи оцінки механічних і жароміцних властивостей.

У третьому розділі «Вивчення впливу ітрію на властивості ливарного жароміцного нікелевого сплаву» за рахунок визначення впливу суми $Ti+Al$ на кількість γ' - фази Проведено систематизацію та узагальнення відомостей щодо впливу сумарної концентрації титану та алюмінію ($Ti+Al$) на формування зміцнювальної γ' - фази в ЖНС з різними типами механізму зміцнення. Відповідно до проведених розрахунків структурної стабільності та збалансованості системи легування показано вплив сум $(Ti+Al) \geq 8.2\%$, $(Cr+W+Mo) \geq 20.8\%$ на виділення евтектичної фази по межах зерен і зниження жароміцності від норм серійної технології підприємства. Проведені дослідження впливу ітрію на мікроструктуру і механічні властивості ЖНС показують, що при додаванні нікель-ітрієвої лігатури в кількості 0,136 % від навішування металу в тиглі, дозволяє забезпечити формування тонких меж зерен без видимих виділень евтектичної ($\gamma-\gamma'$)-фази. Вплив ітрію на тривалу міцність істотно не відзначено.

У четвертому розділі «Розробка модернізованого сплаву ЖСЗДК-ВІ з підвищеними властивостями» обґрунтовано основні критерії вибору технологічних прийомів і матеріалів, прийнятних для проведення удосконалення сплаву ЖСЗДК-ВІ. Проведено теоретичні розрахунки впливу додавання ітрію, гафнію і ніобію, а також варіюванням вмісту вуглецю у сплаві ЖСЗДК-ВІ на властивості та критичні температури сплаву. Проведені розрахунки вихідних плавок сплаву ЖСЗДК-ВІ відомими методами визначення структурної стабільності показали, що плавки придатні для подальшого модифікування, проте вихідна плавка ВП «ЗМЗ» має дисбаланс системи легування, який є вищим за умови збалансованості, що негативно позначилось на її ударній в'язкості. Були проведені дослідні плавки за варіантами комплексної технології модифікування комплексами $[Y+CoAl_2O_4]$, $[Y+Ce+CoAl_2O_4]$, $[Y+Nb+CoAl_2O_4]$, $[Y]$ серійна технологія, а також варіантами комплексної технології модернізації $[Y+Hf+Nb]$, $[Y+Hf+Nb+ВТОР]$.

Дослідні технології показали вплив на макро- та мікроструктуру зразків, розподіл, форму, розміри карбідів, а також на стан меж зерен, що в свою чергу вплинуло на механічні властивості, ударну в'язкість і жароміцність. Так, всі варіанти технології мають рівномірний розподіл карбідів, дискретні глобулярні карбіди, що свідчить про здатність ітрію, як поверхнево активного елемента, підвищувати в'язкість розплаву і концентруватися на поверхні розділу фаз. У той же час в об'ємі і на межах зерен є виділення пластинчастих карбідів з різною довжиною пластин. Згідно з металографічними дослідженнями у варіантах модифікування, крім серійної технології, межі зерен грубі, а при додатковому введенні ніобію і гафнію – отримано тонкі межі зерен, що сприяло збільшенню жароміцності дослідних зразків.

Випробування властивостей зразків дослідного сплаву ЖСЗДК-ВІ показали збільшення значень ударної в'язкості та жароміцності відносно дослідних варіантів і вихідних плавок сплаву.

Встановлено, що для утворення карбідів ніобію і титану необхідно по 0,06 мас. % вуглецю, а сам вміст вуглецю у варіанті [Y+Nb+Hf+VТОР] відповідає 0,06 мас. %, тоді можна зробити висновок, що при вмісті вуглецю 0,06 мас. % буде визначатися дефіцит вуглецю, отже, легуючі елементи будуть витрачатися на легування і утворення структури сплаву.

Для отримання високих властивостей сплаву ЖСЗДК-ВІ проведено розрахунки структурної стабільності та збалансованості звуженого інтервалу легування сплаву ЖСЗДК-ВІ для створення додаткових технічних вимог. Сформульовані рекомендації до процесу виплавки вихідної плавки сплаву та рекомендації до процесу модернізації.

Виплавку ЖНС слід здійснювати на установці, яка оснащена модулем відбору проб для визначення хімічного складу у процесі плавки і за необхідністю корегувати хімічний склад ЖНС до рівня додаткових технічних вимог.

Згідно з результатами промислового випробування модернізованого сплаву вдалося збільшити ударну в'язкість у 2 рази, а жароміцність у 4 рази відносно вихідної плавки сплаву ЖСЗДК-ВІ.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Основні результати досліджень були представлені в 7 наукових статтях, з них: 6 статей у наукових фахових журналах України, 1 стаття опублікована в міжнародному

журналі, що входить до наукометричної бази даних Scopus. Крім того проведена апробація на 3 міжнародних науково-технічних конференціях – опубліковано тези, одні з яких проіндексовані в наукометричній базі Scopus.

Під час написання дисертаційної роботи здобувачем було витримано норми академічної доброчесності. Наукові праці здобувача ґрунтуються на достовірній інформаційній основі та відображають результати його індивідуальних досліджень. Усі наукові результати й висновки, що винесені на захист, належать самому авторові дисертаційної роботи.

Результати наукових досліджень, викладені в дисертації, достатньо повно відображені в наукових статтях автора.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Наявні в роботі твердження про утворення карбідів ітрію та їх вплив на структуру і властивості жароміцних нікелевих сплавів не мають достатнього підтвердження тонкими структурними дослідженнями.

2. Якщо до складу сплаву додаються нові легуючі елементи, то це є не його модернізація, а фактично створення нового сплаву.

3. Для кращої систематизації тексту дисертації необхідно описаний в четвертому розділі механізм роботи ітрію як поверхнево активного елемента для сплаву ЖСЗДК-ВІ перенести в розділ 3.

4. Не надано достатньої інформації про кількість зразків та дослідів для оцінки статистичної достовірності.

5. У тексті наявні орфографічні помилки, не коректні вислови українською мовою, стилістичні неточності, дуже довгі та складні для сприйняття речення.

Попри висловлені зауваження, вони не мають принципового характеру та не знижують загальної цінності наукової новизни й практичного значення отриманих результатів, а також не впливають на загальну позитивну оцінку даної дисертаційної роботи, представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Висновок про дисертаційну роботу

Вищезазначене дозволяє стверджувати, що представлена дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Тьомкіна Дмитра Олександровича на тему «Удосконалення технологічного процесу виготовлення литих робочих лопаток з

жароміцних нікелевих сплавів для забезпечення експлуатаційних властивостей турбіни низького тиску» виконана на високому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, а наведені висновки досліджень та рекомендацій мають суттєве значення для галузі знань Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія.

За своєю актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною представлена дисертаційна робота 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.

Здобувач Тьомкін Дмитро Олександрович у повній мірі заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія.

Рецензент:

Доцент кафедри «Фізичне
матеріалознавство»

Національного університету

«Запорізька політехніка»,

кандидат технічних наук, доцент

