

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

Розробка та вдосконалення технологічних процесів виготовлення виливків з жароміцних сплавів на нікелевій основі для газотурбінних двигунів (ГТД) і установок (ГТУ) є надзвичайно актуальною в умовах зростаючих вимог до надійності, ресурсу та ефективності енергетичного обладнання та авіаційних двигунів. Дисертація присвячена підвищенню експлуатаційних характеристик критично навантажених лопаток турбін шляхом комплексної модернізації технологічного процесу виготовлення виливків зі сплаву ЖСЗДК-ВІ. Обґрунтовано, що вплив модифікувальних і легувальних добавок (ітрій, гафній, ніобій) на фазовий склад, морфологію карбідів і меж зерен має суттєве значення для формування бажаної мікроструктури виливка, яка забезпечує його підвищену тривалу міцність та ударну в'язкість. Сучасність і важливість дослідження посилюється потребами авіаційної та енергетичної промисловості в довговічних, термостійких виробках з матеріалів нового покоління.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів, їх достовірності та новизни

У дисертації представлено переконливі експериментальні результати, підтверджені теоретичними розрахунками фазової стабільності, рівноваги компонентів та карбідоутворення. Використано метод КРАМ для оцінки структурної стійкості.

Наукова новизна здобутих у межах дисертації результатів виявляється в такому:

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. Отримало 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.

Результати проведеного дослідження вирізняються належним рівнем наукової обґрунтованості, узгоджуються з існуючими науковими уявленнями та підтверджують доцільність застосованих підходів. Також викликає інтерес і має суттєву практичну значущість розроблена технологія модернізації [Y+Nb+Hf+VТОР] сплаву ЖСЗДК-ВІ, яка забезпечує значне поліпшення властивостей у порівнянні з серійною технологією: ударна в'язкість зросла в 2 рази, а час до руйнування — в 4 рази. Встановлено вплив тонких меж зерен, карбідів з пластинчастою і дискретною глобулярною морфологією на довговічність виливків.

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

Робота здобувача логічно структурована, охоплює всі необхідні етапи: від аналізу літератури до практичної реалізації. Представлено результати дослідних та виробничих плавок, структурні дослідження, випробування на міцність та жароміцність, що підтверджує завершеність дослідження. Висновки підкріплені експериментальними даними. В дисертації наявні посилання на 160 джерел, зокрема міжнародні роботи, з дотриманням академічної доброчесності. Авторські публікації включають статті у фахових журналах України та в

такому, що індексується в базі Scopus, що свідчить про верифікацію результатів науковою спільнотою.

Вступ

Мова вступу чітка, академічна, з дотриманням наукового стилю. Автор послідовно викладає актуальність дослідження, що полягає в потребі покращення експлуатаційних властивостей литих жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС), зокрема сплаву ЖСЗДК-ВІ. У вступі визначено мету, об'єкт і предмет дослідження, сформульовано задачі, а також окреслено методи. Стиль викладу стриманий, точний, орієнтований на фахівців у галузі металургії та матеріалознавства. Місцями текст насичений підрядними конструкціями, проте логіка збережена.

Змістовно вступ зосереджено на обґрунтуванні комплексного підходу до обробки жароміцних сплавів за допомогою легування гафнієм, ніобієм, модифікування ітрієм та застосування високотемпературної обробки розплаву (ВТОР). Підкреслюється, що саме така технологія сприяє формуванню сприятливої структури — зменшенню карбідних включень, ліквації, ширини меж зерен і покращує тривалу міцність матеріалу. Автор обґрунтовує вибір сплаву ЖСЗДК-ВІ як типового представника відповідальних литих деталей турбіни низького тиску у газотурбінних установках та газотурбінних двигунах.

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

Мова цього розділу оглядова, інформативна, з використанням фахової термінології. Стиль академічний, витриманий, з посиланнями на літературні джерела.

Зміст розділу охоплює характеристики ЖНС, особливості їх кристалізації (рівноосна, спрямована, монокристалічна), механізми утворення фаз, а також вплив домішок і легувальних елементів (Ti, Al, Nb, Hf, C, B, Zr). Значна увага приділена ролі γ - та γ' -фаз у забезпеченні жароміцності, впливу карбідів та ліквації на механічні властивості. Окремо розглянуто методи підвищення жароміцності — від легування до застосування ВТОР. У підрозділах надано аналіз впливу рідкоземельних елементів, що актуалізує застосування ітрію. Таким чином, автор закладає теоретичне підґрунтя для подальших експериментальних досліджень.

Розділ 2. Матеріали та методика дослідження

Мова цього розділу технічна, стилістично витримана. Стиль нейтральний, без оцінок, із суворою послідовністю викладу. Речення структуровані логічно.

У змістовій частині описано технологічні схеми виплавляння сплаву ЖСЗДК-ВІ у виробничих умовах (АТ «МОТОР СІЧ», ВП «ЗМЗ»), наведено варіанти модифікування (ітрієм, ніобієм, гафнієм, мішметалом) та їх комбінації. Визначено, технологію плавки та заливки зразків щодо проведення модифікування та модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ.

Зазначається технологічний процес виготовлення керамічних форм для проведення поверхневого модифікування зразків сплаву. Також охарактеризовано використане обладнання, методики оцінки хімічного складу, макро- і мікроструктури, механічних властивостей. Надано опис методів аналізу міжзеренних виділень, що є критичними для жароміцності. Завдяки цьому розділу обґрунтовується достовірність результатів і відтворюваність експерименту.

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

Мова розділу є науково-аналітичною, з чіткими логічними переходами. Вислови технічні, термінологія використовується коректно. Стиль

У розділі автор детально аналізує вплив модифікування сплаву ЖС6У-ВІ ітрієм. Автор проводить дослідження щодо подальшого розвитку уявлень про використання суми $Ti+Al$ як критерію формування γ' -фази. Оцінюється ризик утворення знеміцнювальних виділень за межами зерен у разі перевищення цієї суми. У висновках підкреслено, що застосування нікель-ітрієвою лігатури в кількості 0,136 % дозволяє «очищати» межі зерен, знижуючи шкідливий вплив евтектичних фаз, тим самим підвищуючи якість матеріалу.

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

Мова насичена спеціалізованою термінологією, синтаксис складний, але витриманий у межах академічної норми. Є тенденція до довгих речень, однак завдяки структурованості виклад залишається зрозумілим.

У цьому ключовому розділі представлено результати розробки та дослідження модернізованого сплаву ЖСЗДК-ВІ. Сформульовано основні вимоги до призначення технологічних методів і матеріалів, що допускаються для модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ. Висвітлено вплив легування Hf , Nb , модифікування Y , а також ВТОР на фазовий склад, розмір і морфологію карбідів, стан меж зерен, міцнісні та пластичні властивості. Особливу увагу приділено розрахункам карбідоутворення з урахуванням вмісту вуглецю та вивільнення легувальних елементів, що дозволяє сформувати глобулярні карбіди, підвищити термостабільність γ' -фази.

Автор подає порівняльний аналіз варіантів технології, демонструючи ефективність комплексного підходу. Представлено практичні рекомендації для впровадження у виробництво, що додає розділу прикладного значення.

Загальні висновки

Мова підсумкового розділу технічна, точна. Кожен пункт є коротким, завершеним твердженням, що базується на матеріалі розділів. Стиль синтетичний, академічно витриманий.

У змісті зведено основні результати роботи: підтверджено вплив модифікування ітрієм на структуру γ' -фази, обґрунтовано механізми дії Nb і Hf, розроблено оптимальну технологію [Y+Nb+Hf+VТОР]. Висновки підкріплені розрахунками, експериментами та виробничими випробуваннями. Автор аргументує, що досягнуте покращення властивостей — наслідок комплексного впливу на фазоутворення та морфологію карбідів. Узагальнення мають завершений вигляд і підсумовують кожен етап роботи. Текст демонструє повну реалізацію поставлених задач і досягнення наукової мети дослідження.

Дисертаційне дослідження охоплює в собі: вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних літературних джерел та 1 додаток. 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.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Результати опубліковані в 7 наукових статтях, з них 6 — у фахових українських виданнях, 1 — у журналі, що індексується в Scopus/WoS. Апробація проведена на 3 міжнародних конференціях.

Під час підготовки дисертаційного дослідження здобувач дотримувався принципів академічної доброчесності. Його наукові публікації ґрунтуються на перевірених джерелах інформації та висвітлюють результати особистих досліджень. Усі висновки й наукові положення, представлені до захисту, є інтелектуальною власністю самого автора.

У публікаціях автора детально подано основні наукові напрацювання, що були розкриті в дисертації.

Недоліки та зауваження

1. В роботі не уточнено терміни "знеміцнюючі фази" та не наведено їхній точний фазовий склад.

2. Підрозділ 4.4.5 має складну структуру та містить недостатньо ілюстративного матеріалу.

3. У розділі 3 показана робота ітрію, яка проявляється в на поліпшенні меж зерен, але не доведено, що це має вплив на механічні і жароміцні властивості ЖНС.

4. У загальних висновках не зроблено чіткого акценту на підвищенні властивостей виливків зі сплаву ЖСЗДК-ВІ шляхом його модернізації — це питання розсіяне серед більшості пунктів.

Хоча в роботі є окремі зауваження, вони не суттєві й не зменшують важливість практичних результатів і наукової цінності, не змінюючи в цілому сприятливого враження від дисертаційного дослідження, поданого до захисту.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота Тьомкіна Дмитра Олександровича є завершеним, самостійним дослідженням, що відповідає вимогам до робіт на здобуття ступеня доктора філософії. Вона вирішує актуальну інженерно-наукову задачу — удосконалення технологічного процесу виготовлення литих робочих лопаток з жароміцних нікелевих сплавів для забезпечення експлуатаційних властивостей турбіни низького тиску. Представлені результати мають новизну, теоретичну і практичну цінність, що підтверджено публікаціями, апробацією й впровадженням у виробництво. 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.

Робота повною мірою заслуговує на позитивну оцінку, а здобувач Тьомкін Дмитро Олександрович – на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія.

Рецензент:

Професор кафедри «Машини
і технологія ливарного виробництва»
Національного університету
«Запорізька політехніка»,
доктор технічних наук, професор

