

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 присвячене удосконаленню технології виготовлення литих лопаток з жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, що широко використовується в турбінах низького тиску газотурбінних двигунів та установок. Особливої значущості вона набуває в умовах підвищення вимог до ресурсу, надійності та довговічності силових агрегатів газотурбінних двигунів та установок (ГТД та ГТУ).

Спосіб підвищення експлуатаційних характеристик нікелевих сплавів для виливків з рівноосною структурою за рахунок підвищення вмісту легувальних елементів часто призводить до їх перенасичення і, як наслідок, утворення структурних компонентів, що знеміцнюють матеріал.

Комплексний підхід автора, а саме поєднання легування, модифікування і високотемпературної обробки розплаву (модернізації сплаву), спрямований на контрольоване досягнення сприятливої структури литих сплавів, підвищення фізико-механічних властивостей, що робить тему дисертації беззаперечно актуальною для галузі.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна отриманих 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 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

формується з розплаву і сприяють зростанню глобулярних карбідів типу MeC . Отриманої за розрахунками кількості ітрію і гафнію, є достатнім для утворення тільки глобулярних карбідів у сплаві ЖСЗДК-ВІ за умови зменшення кількості вуглецю.

3. Отримали подальший розвиток уявлення про процес утворення високотемпературних карбідів ніобію, гафнію і титану. Показано, що при вмісті вуглецю 0,06 мас.% і нижче, буде визначатися дефіцит вуглецю, а отже, легуючі елементи витрачаються 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 мають високий рівень обґрунтованості та збігається з усталеними науковими концепціями. Це підтверджено поєднанням теоретичного моделювання (CALPHAD і КРАМ), експериментальних досліджень з використанням сучасного лабораторного обладнання АТ "МОТОР СІЧ", ВП "ЗМЗ" і промислових випробувань на підприємстві ВП «ЗМЗ». Отримали подальший розвиток уявлення про аспекти впливу модифікування ітрієм, легування гафнієм і ніобієм, а також проведення високотемпературної обробки розплаву (ВТОР) на морфологію інтерметалідів та механічні властивості сплаву. Комплексна технологія $[\text{Y}+\text{Nb}+\text{Hf}+\text{ВТОР}]$ показала значне покращення ударної в'язкості (у 2 рази) та жароміцності (у 4 рази), що підтверджує положення наукової новизни.

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

Дисертаційна робота ТЬОМКИНА Дмитра Олександровича написана українською мовою.

Робота відзначається логічною структурою, послідовністю викладу матеріалу, узгодженістю методичних підходів та чітким науковим стилем. Охоплено всі ключові етапи – від аналізу літератури до практичної апробації технології. Структура дисертації є повною: вступ, 4 розділи дослідження, загальні висновки, список джерел і додаток. Загальний обсяг дисертації становить 145 сторінку, зокрема основного тексту дисертації 126 сторінок, 19 рисунків, 31 таблиця, 1 додаток та перелік використаних літературних джерел із 160 бібліографічних найменувань.

Принципи академічної доброчесності дотримано: результати супроводжені достовірними посиланнями, основна частина матеріалів оприлюднена в рецензованих виданнях, на конференціях. Автор чітко декларує власний внесок, а використання літературних джерел є обґрунтованим і коректним.

Вступ

Вступ дисертації витриманий у класичному стилі технічних і металургійних досліджень: логічний, структурно чіткий, академічно обґрунтований. У ньому автор обґрунтовує актуальність теми, вказуючи на необхідність вдосконалення ливарних технологій для жароміцних сплавів, зокрема з урахуванням вимог до деталей турбін низького тиску. Описано основні труднощі схильність до утворення небажаних фаз. Згадуються провідні дослідники, що підкреслює ґрунтовність підготовки. Мова вступу технічно коректна. Автор використовує загально прийняту професійну термінологію, уникаючи надмірностей, і дотримується академічної етики стилю. Далі наведено мету, завдання дослідження, об'єкт і предмет, а також сформульовано наукову новизну й практичне значення. Усі формулювання чіткі, логічно пов'язані, без стилістичних помилок. Мова не ускладнена, однак вимагає фахового розуміння предмету дослідження. Загалом вступ добре орієнтований на цільову аудиторію – фахівців у галузі металургії, і слугує надійною основою для сприйняття наступних розділів.

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

Розділ присвячено ретельному літературному огляду та аналізу існуючих матеріалів, що застосовуються для виготовлення лопаток ГТД. Автор розглядає особливості конструкції ГТУ, класифікацію та принципи роботи компонентів турбіни, а також надає характеристику існуючим методам лиття: рівноосного, спрямованого, монокристалічного. Стиль цього розділу – науково-оглядовий, інформативний і термінологічно точний. Мовні конструкції складні, але зрозумілі для технічної аудиторії. Ключові технічні терміни ("карбіди МС типу", "первинні γ -виділення", "інтерметалідне зміцнення") використовуються коректно та з посиланнями на літературні джерела. Зміст доповнюється таблицями складу сплавів, прикладами впливу легувальних і модифікуючих елементів на структуру, властивості, фазову рівновагу. Подано аналіз шкідливих домішок, таких як S, O, N, що погіршують властивості ЖНС. Окрему увагу приділено ефекту високотемпературної обробки розплаву (ВТОР) – описано принцип дії, позитивні наслідки для зменшення сегрегації, сприяння рівномірності структури. Розділ написано дуже структуровано, з чітким поділом на підрозділи, що полегшує орієнтацію в матеріалі. Стиль викладення чіткий, витриманий у логіці технічного аналізу.

Розділ 2. Матеріали та методи дослідження.

Цей розділ має прикладний характер і написаний в інженерно-аналітичному стилі. В ньому автор докладно описує, як саме проводилися експерименти, які установки використовувалися, які методики були застосовані. Зокрема, зазначено моделі печей (FM-1-2-100 розробки фірми «ULVAC», та вітчизняна ICB-0,16), сучасні прилади спектрального аналізу (ARL-4460, SPECTROLAB M10), металографічні мікроскопи типів MIM-10 та

Neophotta сучасні прилади для випробувань (ZDMY30, InstronSI-1M, InstronM3). Подається детальна інформація про спосіб введення модифікаторів – нікель-ітрієвої лігатури ItH-1, легувальних сполук на основі Nb, Ce, CoAl_2O_4 . Мова – чітка, технічна, без риторичних елементів. Часто використовуються числові дані, відсоткові концентрації, розрахунки. Описані дослідні варіанти модифікування структури литва з урахуванням ефекту гарячого ізостатичного пресування (ГІП) та впливу поверхневого модифікування при заливці в дослідні керамічні форми, у яких робочий шар виготовлений з алюмінатом кобальту. Особливу увагу приділено розрахункам за методикою КРАМ і CALPHAD. В цілому, стиль цього – функціональний, сухий, але повністю відповідає завданням: створити чітку уяву про методику, яку можна повторити або перевірити.

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

Цей розділ має аналітичний характер, спрямований на пояснення закономірностей, які були виявлені у процесі досліджень. Стиль в основному науковий, з глибокою технічною термінологією. У тексті проводяться чіткі паралелі між хімічним складом і структурою, з посиланням на розрахункові методи.

Автор наводить систематизацію та узагальнення дослідницьких матеріалів про вплив зміни концентрації Ti+Al на утворення γ' -фази в жароміцних нікелевих сплавах з різними механізмами зміцнення, яке описується лінійною лінією тренду зі значним коефіцієнтом детермінації. Відповідно до розрахунків структурної стабільності та рівноваги хімічного складу сплавів зроблено висновок, що при $(\text{Ti}+\text{Al}) \geq 8,2\%$ і $(\text{Cr}+\text{W}+\text{Mo}) \geq 20,8\%$ можливо появлення евтектичної фази на межі зерен, що зменшує жароміцність у порівнянні з технічними параметрами серійного виробництва.

Подано висновки щодо концентрацій, які сприяють зменшенню дефектів – наприклад, введення в сплав 0,136% нікель-ітрієвої лігатури забезпечує формування в ньому тонких меж без виділень.

В розділі передано суть експериментів, та доведено правильності запропонованих підходів.

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

Останній розділ має прикладну спрямованість та є логічно завершеним. Він містить результати використання запропонованої технології в умовах підприємств (АТ "МОТОР СІЧ", ВП "ЗМЗ"). Стиль – технічний, із численними цифрами, порівняльними таблицями. Зміст цього розділу структурований за впливами: на макроструктуру, морфологію карбідів, фазову стабільність, міцність при тривалому навантаженні.

Автор обґрунтовує ключові критерії відбору технологій і матеріалів, придатних для модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ. Аргументує розрахунками,

заснованими на методах КРАМ, РНАСОМР та ін., які визначають здатність вихідних плавок до модифікування, легування тощо, і взагалі до модернізації. Наводить ефективність комплексної модернізації [Y+Nb+Hf+ВТОР], що підтверджується результатами механічних випробувань. Зміна морфології зерен забезпечує підвищену надійність деталей. За результатами комплексної модернізації ударна в'язкість при випробуванні зразків зросла з 21,7 Дж/см² до 48,3 Дж/см², а час до руйнування при температурі 850 °С та навантаженні 350 МПа збільшився з 150 год. до 671 год.

Розділ містить цінну інформацію для практичного виробництва: розрахунок шихти, температурні параметри виплавки, вимоги до хімічного складу, режимів ВТОР. Наведені рекомендації гарантують можливість реального застосування результатів дослідження у виробництві.

Розділ «Загальні висновки» є завершенням дисертаційної роботи й демонструє, що автор повною мірою досяг поставленої мети. Стиль викладення стислий, тезовий, але водночас науково вивірений і послідовний. Усі основні результати згруповані за тематичними блоками: вплив легування, модифікування, високотемпературної обробки розплаву (ВТОР), карбідоутворення, мікроструктурні особливості та механічні властивості сплаву ЖСЗДК-ВІ. Мова висновків чітка, фактична. Автор формує завершену систему знань, яка підводить до практичних рекомендацій.

Зміст висновків охоплює наступні ключові моменти. Визначено оптимальні інтервали для легування сплаву Nb і Hf. Встановлено, що ітрії сприяє зменшенню дендритної ліквідації та покращенню стабільності структури. Показано, що в результаті застосування запропонованої технології [Y+Nb+Hf+ВТОР] ударна в'язкість сплаву зростає у 2 рази, а час до руйнування – у 4 рази. Зазначено, що саме обробка розплаву на першу і другу критичні точки ВТОР дозволяє мінімізувати дефекти типу пор і евтектичних включень.

Подано рекомендації щодо промислового застосування. Загальні висновки свідчать про високу якість проведеної роботи й важливе прикладне значення отриманих результатів.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Автор опублікував 7 наукових статей, з яких одна індексується в Scopus/WoS, ще 6 – у фахових журналах. Це є достатнім рівнем для підтвердження апробації результатів. Крім того, результати доповідались на трьох науково-технічних конференціях. Оприлюднення охоплює всі основні аспекти роботи: модифікування, легування, зниження вмісту вуглецю, вплив ВТОР, аналітичні розрахунки.

У процесі створення дисертації автор керувався нормами наукової доброчесності. Представлені ним дослідницькі матеріали опираються на надійні джерела і демонструють результати самостійно проведеної роботи. Всі положення та висновки, що виносяться на публічний захист, є особистим

надбанням здобувача.

Недоліки та зауваження.

1. У тексті трапляються випадки непослідовності у вживанні термінології, що ускладнює сприйняття. Наявні стилістичні неточності і орфографічні помилки.

2. В роботі не надано докладної інформації про тривалість експлуатації лопаток, виготовлених за серійною технологією, та обсяг використання означених виробів при виготовленні ГТД і ГТУ.

3. В роботі немає оцінки залишкової пористості литва та її впливу на експлуатаційну надійність готових виробів.

4. При розгляді процесів карбідоутворення недостатньо деталізовано наведену модель реакції.

5. Бажано б було більш докладно висвітлити механізм впливу ВТОР на формування γ -матриці та структурних компонентів (γ' -фази, карбідів та інших) жароміцних сплавів.

6. Не висвітлено, які саме недоліки серійної технології вдалося подолати за рахунок запропонованої модернізації.

Незважаючи на наведені зауваження, вони не є критичними та не применшують загальну значущість наукової новизни і практичної користі отриманих результатів, а також не змінюють загального схвального враження від дисертаційної роботи, поданої на здобуття ступеня доктора філософії.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота Дмитра ТЬОМКІНА на тему «Удосконалення технологічного процесу виготовлення литих робочих лопаток з жароміцних нікелевих сплавів для забезпечення експлуатаційних властивостей турбіни низького тиску» є завершеним, самостійним, комплексним науковим дослідженням, яке зробило суттєвий внесок у галузь лиття жароміцних сплавів. У роботі обґрунтовано технологічне рішення щодо покращення механічних властивостей та довговічності литих лопаток за рахунок комбінованого впливу легування, модифікування і ВТОР (модернізації). Результати мають прикладний характер, підтверджені виробничими випробуваннями, належно апробовані й оприлюднені. Автор продемонстрував глибоке розуміння сучасних технологій лиття та здатність до їх наукового розвитку.

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.

Дисертація повністю відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт відповідного рівня, а її автор Тьомкін Дмитро Олександровича заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія.

Офіційний опонент:

Завідувач відділу спеціальних сталей та сплавів
Фізико-технологічного інституту
металів та сплавів НАН України
доктор технічних наук,
член-кореспондент НАН України

Юлія КВАСНИЦЬКА

Підпис офіційного опонента, зав. відділу ФТІМС НАН України,
чл.-кор. НАН України Юлії Квасницької засвідчую:

Вчений секретар
Фізико-технологічного інституту
металів та сплавів НАН України
к.т.н., ст.н.сп.



Володимир ЛАХНЕНКО