

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Данилова Сергія Миколайовича

на тему «**Розробка технології комплексного модифікування жароміцного нікелевого**

сплаву для великогабаритних лопаток авіаційних газотурбінних двигунів»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

в галузі знань **13 Механічна інженерія**

за спеціальністю **136 Металургія**

Актуальність теми дисертації.

Проблема забезпечення надійності, довговічності та ресурсу роботи газових турбін є найбільш складною серед чисельних проблем, що виникають на шляху розвитку сучасного авіаційного газотурбобудування. Найважливішими елементами газової турбіни є робочі лопатки роторної частини (високого та низького тиску), матеріал і конструкція яких значною мірою визначають ресурс їх роботи та припустиму температуру газів перед турбіною, що безпосередньо впливає на потужність, економічність та інші характеристики двигунів.

Для вирішення проблем надійності і ресурсу газових турбін найчастіше застосовують нові жароміцні сплави, що мають в своєму складі елементи із низькими коефіцієнтами дифузії, які зазвичай є високовартісними та дефіцитними. Звісно застосування нових жароміцних сплавів вирішує проблему збільшення опору деформаціям і руйнуванню лопаток в умовах високих температур та навантажень, але економічна сторона питання та перспективи розробки нових матеріалів у цій царині залишаються відкритими. Вирішення зазначеної проблеми може полягати у вдосконаленні існуючих жароміцних сплавів шляхом їх додаткового легування, модифікування та мікролегування. В цьому випадку невеликі добавки легувальних або модифікувальних елементів можуть чинити значний вплив на мікроструктуру сплаву та його властивості. Останнім часом, світовими та українськими дослідниками розроблено цілу низку модифікаторів, застосування котрих спрямовано на поліпшення структурного стану жароміцних сплавів та покращення рівня їх службових характеристик.

Незважаючи на досягнуті успіхи в цій галузі, питання, що стосуються впливу металургійної технології, хімічного складу вихідних сплавів на механічні та службові характеристики відповідальних виливків залишаються недостатньо вивченими. Дослідження цих та інших питань є актуальними як для наукових, так і для виробничих цілей з модернізації існуючих та розробки перспективних авіадвигунів.

У зв'язку із вище зазначеним, тематика дисертаційної роботи Данилова Сергія Миколайовича, що вирішує завдання застосування комплексного підходу при вирішенні проблеми підвищення характеристик відповідальних виливків деталей ГТД, котрі працюють в умовах складнонапруженого стану є актуальною.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у наступному:

1. Вперше встановлено закономірності формування раціональної структури, яка забезпечує підвищення властивостей виливків із жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, отриманих з використанням комплексного модифікування – $(0,05\%Ti(C,N)+0,01\%Y+5\%CoAl_2O_4)$, гарячого ізостатичного пресування та термічної обробки.

2. Вперше отримано структури жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, сформовані під одночасним впливом інокулювальної дії керамічної форми, виготовленої з використанням алюмінату кобальту та об'ємного модифікування карбонітридами титану й поверхнево активним елементом – ітрієм, котрі характеризувалися зміною морфології карбідної складової із шрифтової на глобулярну, дрібнодисперсністю карбонітридних включень, сприятливою морфологією інтерметалідної γ' -фази та їх рівномірним розподілом, що підтверджено методами оптичної й електронної мікроскопії.

3. Вперше встановлено склад комплексного модифікатору для отримання крупногабаритних виливків із жароміцного сплаву та визначено раціональну кількість його складових – $(0,05\%Ti(C,N)+0,01\%Y+5\%CoAl_2O_4)$. Розроблено технологію введення його у нікелевий розплав, визначено характер зміни структурного стану жароміцного сплаву під дією модифікатору та механічних властивостей – підвищено показники пластичності й ударної в'язкості, тривалу міцність у порівнянні із сплавом, що отриманий за серійною технологією вакуумного рівноважного литва.

4. Вперше отримано відомості щодо впливу комплексного застосування модифікаторів різного механізму дії на втомні характеристики зразків жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ та визначено границю витривалості σ_{-1} при багатоциклових втомних випробуваннях, що дозволило розширити уявлення про вплив комплексного модифікування на втомну витривалість виливків із відповідального жароміцного литва.

Наукова новизна отриманих результатів чітко сформульована та зрозуміло викладена, із розкриттям суті. Сформульовані автором положення наукової новизни є обґрунтованими та відповідають поставленим в ній завданням. Закономірності впливу

модифікаторів на структурний стан та властивості виливків підтверджені результатами ґрунтовних досліджень, а практичні рекомендації – серією експериментальних результатів, отриманих в ході промислового випробування розроблених технологій. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в фахових наукових виданнях та пройшли апробацію на міжнародних конференціях з металургії.

Поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання щодо розробки технології, котра підвищить механічні властивості великогабаритних лопаток авіаційних двигунів виконане в повному обсязі. При виконанні експериментальних та теоретичних досліджень здобувач продемонстрував наявність необхідних компетентностей та володіння методологією наукової діяльності повною мірою.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Данилова Сергія Миколайовича повністю відповідає стандарту освіти зі спеціальності 136 Металургія галузі знань 13 Механічна інженерія та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Металургія. Здобувачем виконано інформаційний пошук методів розв’язання задач дослідження, проведено критичний аналіз джерел наукової літератури по визначеній тематиці, методик проведення експерименту і надано опис та аналіз результатів дослідження. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Металургія».

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

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою. Стиль викладення матеріалу чіткий та зрозумілий, з використанням загальноновживаної термінології наукового напрямку, робота добре структурована.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та 2-х додатків. Загальний обсяг дисертації становить 131 сторінку, у тому числі основного тексту дисертації 107 сторінок, 41 рисунок, 10 таблиць, 2 додатки і список використаних джерел зі 118 бібліографічних найменувань.

У вступі обґрунтовано актуальності теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, описано методи дослідження, надана інформація про наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі проведено детальний аналіз літературних джерел з дослідження існуючих проблем за напрямом роботи. Зокрема автор відзначає, що основними причинами руйнувань лопаток газотурбінних двигунів в процесі експлуатації є процеси втоми та повзучості, термічна втома, високотемпературна корозія та окислення та інші. Визначено, що одним із ключових факторів, який забезпечує експлуатаційну надійність великогабаритних лопаток турбіни є пластичність матеріалу, через забезпечення в матеріалі здатності релаксувати локальні напруження, чинити опір міжзеренному руйнуванню, а також зародженню та поширенню тріщин. Запропоновані наступні методи регулювання структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів, що засновані на застосуванні: модифікаторів першого роду у вигляді рідкоземельного металу ітрію, модифікаторів другого роду у вигляді дисперсних часток тугоплавких сполук – карбонітридів титану, та поверхневе модифікування алюмінатом кобальту. Автор ставить питання по визначенню впливу комплексного (сумісного) впливу зазначених технологій з метою більш повно реалізовувати переваги окремих видів модифікування й досягти підвищеного рівня експлуатаційних характеристик матеріалу відповідальних виливків.

У другому розділі наведений опис застосованих матеріалів та методик, що були використані автором для проведення дослідження. Наведені характеристики обраних матеріалів, ґрунтовно розкрито технологію виготовлення ливарних керамічних форм та особливості модифікування жароміцного розплаву компонентами, що розглядаються. Виконано опис технологічного обладнання котре використовувалось при реалізації досліджень.

Третій розділ дисертації присвячений дослідженню із визначення впливу технологій модифікування на структуру та властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ. Оґрунтовано вибір модифікаторів для покращення механічних характеристик дослідного жароміцного нікелевого сплаву. Досліджено хімічний склад виливків дослідних технологій модифікування, та їх вплив на макро- й мікроструктуру, механічні властивості, а також виконано аналіз фрактограм руйнування зламів зразків, що пройшли випробування на ударну в'язкість. На основі проведеної серії досліджень автором отримані наступні результати: показано, що поверхневе модифікування алюмінатом кобальту CoAl_2O_4 , об'ємне модифікування ітрієм або дисперсними частками карбонітриду титану $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ та їх комплексне застосування забезпечують суттєве подрібнення макро- та мікроструктури сплаву. Під впливом ітрію в сплаві відбулася зміна морфології карбідної

фази зі шрифтової на глобулярну. Найвищі показники міцності та жароміцності, отримані при застосуванні у якості модифікаторів ітрію, а високі рівні пластичності та ударної в'язкості отримані під впливом комплексного модифікування. Автором запропоновано виконання раціоналізації (вдосконалення) технологічної схеми модифікування через невисокий рівень жароміцності продемонстрований при комплексному модифікуванні.

Четвертий розділ дисертації присвячений проведенню досліджень із вдосконалення технології модифікування нікелевих сплавів для відповідального литва. Зокрема, запропоновано провести вдосконалення технології комплексного модифікування шляхом зменшення вмісту часток карбонітриду титану, що вводяться у розплав. Для проведення раціоналізації технології обрано наступні концентрації модифікатору – карбонітриду титану $Ti(C,N)$: 0,025% (мас.); 0,050% (мас.); 0,075% (мас.).

Дослідженнями передбачалося визначення хімічного складу виливків, отриманих зі сплаву ЖСЗДК-ВІ за вдосконаленими технологіями, аналіз структури, фрактографії зламів ударних зразків, та їх вплив на механічні властивості.

Результати з вдосконалення технологій комплексного модифікування показали, що комплексне модифікування жароміцного розплаву ітрієм зі змінним вмістом карбонітриду титану з 0,025% до 0,075% та алюмінатом кобальту, пришвидшували проходження кристалізаційних процесів, що призводило до подрібнення макрозерна у виливках, рівномірного розподілення дрібнодисперсних карбідів й карбонітридів та γ' -фази. Представляють інтерес результати досліджень отримані методом РСМА, котрі показали наявність в структурі комплексно модифікованого сплаву глобулярних ітрієво-вмісних карбідів, котрі, згідно з припущенням автора, можуть виступати підложкою для зародження на них карбідів низькотемпературних модифікацій.

Грунтуючись на отриманні даних по забезпеченню в сплаві раціональної структури, та кращих показників ударної в'язкості й жароміцності автором визнано розроблену технологічну схему комплексного модифікування – $0,01\%Y + 0,050\%Ti(C,N) + 5\%CoAl_2O_4$ раціональною й її рекомендовано до промислового опробування при виготовленні великогабаритних відповідальних виливків газотурбінних двигунів.

У п'ятому розділі наведено результати промислової апробації та економічна ефективність впровадження вдосконалених технологій комплексного модифікування при виготовленні великогабаритних лопаток турбіни вентилятору авіаційного двигуна Д-18Т. На основі розробленої вдосконаленої технології комплексного модифікування – $0,01\%Y + 0,050\%Ti(C,N) + 5\%CoAl_2O_4$ автором отримані виливки великогабаритних лопаток турбіни вентилятору (ТВ) авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т, які за станом поверхні (за кількістю та розташуванням світинь) відповідали вимогам нормативної

документації. В структурі виливків лопаток ТВ сформовано дрібнокристалеву будову, з наявністю рівномірно розташованих дрібних карбідів і карбонітридів. Лопатки отримані з використанням вдосконаленої пройшли випробування на кут загину котрий характеризувався величиною у 120° без утворення тріщин. Рівень властивостей зразків отриманих разом із виливками великогабаритних лопаток показав відповідність вимогам нормативної документації. Випробуваннями на опір втомному руйнуванню визначено границю витривалості зразків отриманих разом із виливками лопаток ТВ – 441 МПа.

Очікуваний економічний ефект від впровадження практичних рекомендацій по використанню розроблених технологій комплексного модифікування становить 977868 грн. при виготовленні ротору ТВ двигуна Д-18Т.

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.

Наукові результати дисертації роботи висвітлені у 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статей у фахових виданнях України, з яких 1 стаття у виданні, яке включене до міжнародної наукометричної бази даних Scopus; 8 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях. Публікації здобувача мають достовірну наукову базу та є результатом самостійних досліджень. Наукові положення та висновки дисертації, що виносяться на захист, належать здобувачу. В усіх наукових публікаціях дотримано принципи академічної доброчесності, всі запозичені результати інших авторів мають відповідні посилання. Наукові результати досліджень, які описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В роботі слабо простежується чіткість термінології, зазначені терміни «комплексне модифікування», «комплексний модифікатор», «комплексне модифікування за схемою...», «модифікування модифікаторами 1 и 2 роду», «комплексний вплив модифікаторів», що ускладнює сприйняття основної ідеї, що була закладена в роботі. В розділі 4 використовуються терміни «вдосконалені», «раціональна», «раціоналізована» технологія, що також ускладнює сприйняття представленого матеріалу. Слід більш уніфіковано підходити до використання термінології, вона повинна бути єдиною й сталою.

2. В методологічній частині роботи бажано б було привести реальну кількість нікель-ітрієвої лігатури, котра вводилася у розплав для отримання в сплаві вмісту ітрію у кількості 0,01%, адже ітрії володіє високим коефіцієнтом вигоряння, тому врахування його засвоєння розплавом має велике значення для правильного виконання процесу

плавлення. Теж саме стосується і ваги брикетованого модифікатору; бажано було б навести вагу брикетів карбонітриду титану, якими модифікували розплав, оскільки для ливарників такі практичні дані завжди представляють реальний інтерес.

3. У розділі 5.1 не вказано норми для межі витривалості сплаву ЖСЗДК-ВІ при втомних випробуваннях.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними та не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів роботи й не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Данилова Сергія Миколайовича на тему «Розробка технології комплексного модифікування жароміцного нікелевого сплаву для великогабаритних лопаток авіаційних газотурбінних двигунів» виконана на високому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені пунктами 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 №44 від 12 січня 2022 р.

За актуальністю, новизною та об'ємом одержаних результатів, їх практичним значенням дисертаційна робота Данилова Сергія Миколайовича відповідає всім вимогам, що ставляться до дисертації на здобуття ступеня доктора філософії, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 Металургія.

Рецензент:

професор кафедри

«Машини та технологія

Ливарного виробництва»

Національного університету

«Запорізька політехніка»,

доктор технічних наук

Підпис Воденніков Сергій

Засвідчую:

Начальник відділу кадрів

Миронюк О.П.



Сергій ВОДЕННІКОВ

