

## **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**

Розвиток авіаційної промисловості пов'язаний з розробкою газотурбінних двигунів (ГТД) з підвищеним ресурсом роботи, надійністю й заниженими витратами палива. Застосування сучасних жароміцних матеріалів з підвищеними характеристиками, а також використання нових методів виробництва виробів грає ключову роль у вирішенні цієї задачі. На даний момент розвиток сучасного двигунобудування лімітується властивостям жароміцних матеріалів, серед яких провідне положення займають сплави на нікелевій основі. Підвищення робочих характеристик нікелевих сплавів традиційними способами (збільшення вмісту легувальних елементів, вдосконалення технологій термомеханічного зміцнення й т.ін.) на сьогоднішній день практично вичерпало свої можливості. Тому розробка принципово нових жароміцних сплавів та інноваційних технологій їх отримання є вкрай важливою науково-технічною задачею. Певний резерв у підвищенні робочих температур й ресурсу матеріалів деталей установок турбінного типу залишається у використанні активних елементів або їх сполук для підвищення фізико-механічних та експлуатаційних показників литих деталей гарячого тракту ГТД. Основними задачами при цьому, як правило, є подрібнення зерна, підвищення комплексу фізико-механічних показників, конструктивної міцності та експлуатаційних властивостей.

У зв'язку із зазначеним, дослідження спрямовані на розробку ефективних технологій виготовлення відповідальних деталей газотурбінних двигунів є актуальними і вирішують важливу проблему сучасного авіабудування по збільшенню рівня службових характеристик матеріалу деталей гарячого тракту ГТД, підвищенню конкурентоздатності української продукції при мінімальних матеріальних витратах.

## Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукова новизна результатів дисертації 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  $\gamma'$ -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 рівновісного 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  $\sigma_{-1}$  при багатоциклових втомних випробуваннях, що дозволило розширити уявлення про вплив комплексного модифікування на втомну витривалість виливків із відповідального жароміцного литва.

Положення наукової новизни повністю відповідають завданням, що були поставлені перед науковою роботою. Сформульовані автором висновки є обґрунтованими, що підтверджуються результатами експериментальних досліджень та промислового випробування розроблених технологій. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в фахових наукових виданнях та пройшли апробацію на міжнародних конференціях з металургії та матеріалознавства.

Поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання щодо розробки технології, котра підвищить механічні властивості великогабаритних лопаток авіаційних двигунів

виконане в повному обсязі. Результати досліджень, якість їх виконання та узагальнення свідчать, що здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**

Представлена дисертаційна робота здобувача Данилова Сергія Миколайовича за своїм змістом відповідає стандарту освіти зі спеціальності 136 Металургія галузі знань 13 Механічна інженерія та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Металургія. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувача у загальну галузь знань Механічна інженерія.

Після аналізу представленого звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння можна стверджувати, що кваліфікаційна робота Данилова Сергія Миколайовича є результатом його власних наукових досліджень. У роботі відсутні ознаки фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату, запозичень або несанкціонованого використання здобувачем результатів інших авторів. Використані дисертантом ідеї, результати та тексти інших авторів чітко відзначені відповідними посиланнями.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою. Суть дисертаційної роботи подана послідовно та зрозуміло. Автором використано загальнонавчальну термінологію наукового напрямку, що сприяє повному розумінню представлених результатів досліджень.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та 2 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 актуальність теми дисертаційного дослідження, наведено мету, об'єкт та предмет дослідження. Так, метою роботи було підвищення механічних властивостей великогабаритних лопаток авіаційних газотурбінних двигунів при комплексному застосуванні модифікаторів різного механізму дії за рахунок отримання раціональної структури виливків із жароміцного сплаву ЖСЗДК-ВІ. Об'єкт дослідження – процеси структуроутворення при комплексному модифікуванні, що сприяють отриманню

раціональної структури жароміцного сплаву на нікелевій основі. Їй відповідному забезпеченню рівня механічних, жароміцних та експлуатаційних властивостей, котрі задовольняють вимогам галузевої нормативної документації. Предметом дослідження було обрано характеристики структури, механічних, жароміцних та втомних характеристик жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ після комплексного застосування модифікаторів 1 и 2 роду, а також інокулювального впливу. Також у вступі описано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; наведено методи дослідження та відображено практичне значення одержаних результатів дослідження; презентовано списки опублікованих праць за тематикою дисертаційної роботи та конференцій, на котрих було апробовано основні результати дисертаційної роботи.

У першому розділі «Вплив модифікування на пластичність жароміцних нікелевих сплавів» розглянуто стан проблеми підвищення пластичності жароміцних нікелевих сплавів які традиційно використовуються для виготовлення великогабаритних лопаток авіаційних газових турбін та газоперекачувальних апаратів. Проаналізовано умови роботи лопаток турбін, основні причини руйнувань лопаток турбін в процесі експлуатації, та показано, що забезпечення заданого рівня пластичності матеріалу лопаток дозволяє релаксувати концентрацію напружень у вершині тріщин, що уповільнює їх ріст в умовах циклічного навантаження, й тим самим загальмувати процес розвитку втомного руйнування та чинити опір повзучості. При цьому було розглянуто шляхи підвищення пластичності, ударної в'язкості, жароміцності та опору втомі лопаток турбіни за рахунок використання модифікаторів 1 и 2 роду, а також інокулювального впливу.

Аналітичний огляд літератури дозволив автору виявити ряд невирішених проблем у питанні, що розглядається. Зокрема, зазначено, що недостатньо вивчено комплексний вплив модифікаторів, відсутні системні дані щодо впливу РЗМ на пластичність сплавів при їх сумісному застосуванні з модифікаторами різного механізму дії, потребують уточнення механізми комплексного впливу модифікаторів на структуру та властивості авіаційного жароміцного сплаву.

У другому розділі «Матеріали та методика досліджень» наведені матеріали, що використовувалися для проведення заданої серії досліджень, технології виплавлення вихідного жароміцного сплаву, виготовлення модифікованих керамічних форм для лиття за витоплюваними моделями, виготовлення брикетованого модифікатору – карбонітриду титану, описано технологічний процес модифікування жароміцного розплаву ітрієм, карбонітридами титану, а також технологічні операції гарячого ізостатичного пресування та термічної обробки дослідних виливків. Показано, що для дослідження отриманих

виливків, використовувалися сучасні методи якісної та кількісної оцінки структурних складових сплавів, а також визначення механічних, жароміцних та втомних характеристик.

У третьому розділі «Дослідження впливу технологій модифікування на структуру і властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ» виконано обґрунтування вибору модифікаторів для покращення механічних характеристик жароміцного нікелевого сплаву та їх доцільні концентрації при введенні у розплав. Зокрема, автором було запропоновано дослідити особливості впливу модифікування трьома способами: поверхневим модифікуванням алюмінатом кобальту ( $5\% \text{CoAl}_2\text{O}_4$ ), об'ємним модифікуванням ітрієм ( $0,01\% \text{Y}$ ) та карбонітридом титану ( $0,1\% \text{Ti(C,N)}$ ), а також з їх сумісним комплексним застосуванням. Виконано порівняння структури та властивостей дослідних варіантів технології модифікування із властивостями матеріалу, що отриманий за допомогою традиційної серійної технології вакуумного рівноважного жароміцного литва. Проведені дослідження дозволили встановити ефективність впливу технології модифікування на структуру та властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ. Показано, що поверхнєве модифікування алюмінатом кобальту  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ , об'ємне модифікування ітрієм або дисперсними частками карбонітриду титану  $\text{Ti(C,N)}$  та їх комплексне одночасне застосування забезпечують суттєве подрібнення макро- та мікроструктури сплаву. Під впливом ітрію в сплаві відбулася зміна морфології карбідної фази з шрифтової на глобулярну, що, забезпечило в сплаві найвищі показники міцності та жароміцності. Отримані результати дослідження продемонстрували, що найбільш перспективною технологією, спрямованою на підвищення пластичності та ударної в'язкості матеріалу великогабаритних лопаток – жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, є технологія комплексного модифікування ( $\text{Ti(C,N)}+\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ). При цьому автор заявляє, що невисокий, порівняно з деякими іншими варіантами технології модифікування, рівень жароміцності продемонстрований при використанні цієї технологічної схеми модифікування, вимагає її вдосконалення та раціоналізації.

У четвертому розділі «Вдосконалення технології модифікування нікелевих сплавів для відповідального литва» виконано серію досліджень спрямованих на вивчення структурних змін і механічних властивостей виливків відповідального литва, отриманих за вдосконаленими технологіями комплексного модифікування. Зокрема показано, що для подальшого покращення структурного стану жароміцного литва проведення тестових плавлень краще проводити у напрямку зниження кількості модифікаторів – карбонітридів титану  $\text{Ti(C,N)}$ , що вводяться у розплав. Запропоновано при визначенні раціонального вмісту модифікаторів при комплексному модифікуванні вводити брикетований карбонітрид титану  $\text{Ti(C,N)}$  для отримання його за розрахунком в

сплавів: 0,025% (мас.); 0,050% (мас.); 0,075% (мас.). Концентрації ітрію при введенні у розплав та алюмінату кобальту у першому робочому шарі керамічної ливарної форми залишалися незмінними. Результати досліджень показали, що застосування технології усіх дослідних варіантів комплексного модифікування пришвидшувало проходження кристалізаційних процесів, що в свою чергу, сприяло подрібненню макрозерна у виливках, забезпечило в структурі рівномірно розподілені дрібнодисперсні карбідну й карбонітридну складові. Відмічено вплив комплексного модифікування на кількість та середні розміри  $\gamma'$ -фази. В структурі комплексно модифікованого сплаву усіх варіантів, поряд із карбідами сферичної морфології, було виявлено глобулярні карбіди, що були збагачені на ітрій, молібден та титан, та збіднені на хром. Метод рентгеноспектрального мікроаналізу та аналіз літературних джерел дозволили зробити припущення, що ітрієвомісні високотемпературні карбіди типу YC можуть виступати підложкою для зародження на них карбідів низькотемпературних модифікацій. Забезпечення в структурі дисперсності фазових складових та їх рівномірне розподілення за об'ємом сприяли підвищенню механічних характеристик сплаву. При цьому, кращий вплив на показники пластичності та часу до високотемпературного руйнування, отримано при використанні технологічної схеми комплексного модифікування –  $0,01\%Y+0,050\%Ti(C,N)+5\%CoAl_2O_4$ . В цьому випадку, за рівнем ударної в'язкості комплексно модифікований сплав перевищував більше ніж у два рази вимоги нормативної документації. Узагальнюючи отримані результати проведених експериментів, відзначено, що застосування технологічної схеми комплексного модифікування –  $0,01\%Y+0,050\%Ti(C,N)+5\%CoAl_2O_4$  було прийнято автором за раціональну й рекомендовано для промислового опробування при отриманні натурних виливків деталей газотурбінних двигунів.

У п'ятому розділі «Промислове випробування та економічна ефективність модифікування жароміцного нікелевого сплаву» наведено результати промислового випробування запропонованої у дисертаційній роботі технології комплексного модифікування –  $0,01\%Y+0,050\%Ti(C,N)+5\%CoAl_2O_4$  жароміцного сплаву ЖСЗДК-ВІ при виготовленні виливків великогабаритних (з довжиною  $\sim 300$  мм) лопаток турбіни вентилятора газотурбінного двигуна великої потужності Д-18Т. Досліджено вплив запропонованої технології на стан поверхні виливків, макро- та мікроструктуру, механічні властивості. Методом люмінесцентного контролю ЛЮМ1-ОВ на поверхні виливків дослідних робочих лопаток турбіни вентилятора виявлені точкові світіння люмінофору, інтенсивність котрих в партії отриманих модифікованих виливків лопаток відрізнялась за кількістю. Неприпустимих нормативною документацією поверхневих металургійних дефектів не виявлено. Усі отримані лопатки визнані придатними, та такими, що

відповідають затвердженому контрольному зразку при здавальних випробуваннях. Макроструктура дослідних робочих лопаток, виготовлених із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ, задовільна, щільна, неприпустимі забруднення металу не виявлені. Відмічено подрібнення макрозерна в поверхневих зонах лопаток, а також у всьому дослідному перерізі. В мікроструктурі матеріалу дослідних лопаток карбіди й карбонітриди виділялися, в основному, у вигляді рівномірно розподілених в об'ємі металу дискретних глобулярних часток.

Для оцінки здатності лопаток сприймати навантаження без руйнування та їх інтегральної пластичності використано методику випробування лопаток на кут загину, що заснована на вимогах стандарту ДСТУ ISO 7438:2005, яка підтвердила достовірність і стабільність результатів. Зокрема, показано, що лопатки відлиті з використанням комплексного модифікування, характеризувалися кутом загину, що перевищував  $120^\circ$  без формування тріщин в зоні загину. При цьому в лопатках, отриманих за серійною технологією, кут загину становив  $90-124^\circ$  з формуванням тріщин довжиною 2-16 мм в зоні загину лопатки.

Властивості, що були визначені при випробуванні зразків, отриманих разом із лопатками, показали відповідність вимогам нормативної документації комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ й підтвердили дані, отримані при розробці вдосконалених технологій модифікування. Втомними випробуваннями встановлено, що границя витривалості для сплаву ЖСЗДК-ВІ, отриманого з використанням раціонального комплексу модифікаторів становить 441 МПа.

Очікуваний економічний ефект від впровадження на АТ «Запорізький машинобудівний завод ім. В.І. Омельченко» практичних рекомендацій по використанню розроблених технологій комплексного модифікування склав 977868 грн. при виготовленні ротору ТВ авіаційного двигуна Д-18Т за рахунок збільшення виходу придатного литва.

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. Також результати дисертації пройшли апробацію на 8 міжнародних наукових конференціях з металургії.

При підготовці дисертації автором дотримано принципів академічної доброчесності. Публікації здобувача мають достовірну наукову базу та є результатом самостійних досліджень. Наукові положення та висновки дисертації, що виносяться на захист, належать здобувачу. Наукові результати досліджень, які описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

1. У загальних висновках зазначено про «отримання подальшого розвитку встановлення причин руйнування роторних деталей гарячого тракту ГТД» хоча зроблене лише літературний огляд цих причин. Тематика розвитку встановлення причин більше відноситься до досліджень, що передбачаються дисертаціями наступного фахового рівня, наприклад в докторських дисертаціях.

2. В роботі необхідно було б забезпечити кращу узгодженість підходів до використання термінології, зокрема, в графах таблиць зустрічаються підписи «варіант технології модифікування», «варіант модифікування», «вміст Ti(C,N)», що погіршує сприйняття результатів дослідження.

3. Не зрозуміло як розраховувався економічний ефект від впровадження розробки у виробництво. У розділі 5.1 зазначається, що з використанням розробленої технології комплексного модифікування час до руйнування зріс у 10 разів, при цьому економічний ефект розраховано через збільшення виходу придатних виливків.

Однак, наведені зауваження не є визначальними та не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів роботи, не впливають на позитивну оцінку представленої дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Вище наведене дозволяє стверджувати, що представлена 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, а сукупність її теоретичних та практичних результатів розв'язує важливе наукове завдання, яке має суттєве значення для галузі знань Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія. За своєю актуальністю, практичною цінністю та науковою

Здобувач Данилов Сергій Миколайович у повній мірі заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія.

Доцент кафедри «Фізичне  
матеріалознавство»  
Національного університету  
«Запорізька політехніка»,  
Кандидат технічних наук

Підпис

**ЗАСВІДЧУЮ  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"**

