

ВІДГУК

офіційного опонента 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.

Для перспективних газотурбінних двигунів підвищення коефіцієнту корисної дії визначається температурою газу на вході в турбіну, що вимагає застосування нових матеріалів з підвищеною жароміцністю для виготовлення лопаток, або вдосконалення серії існуючих жароміцних нікелевих сплавів. Великогабаритні лопатки сучасних авіаційних газотурбінних двигунів, відрізняються великими габаритними розмірами (висота ≥ 300 мм) з наявністю місць з підвищеною концентрацією напружень, характер розподілення котрих зазвичай є нерівномірним. В процесі експлуатації це може привести до руйнування великогабаритних лопаток шляхом крихкого відриву під дією зовнішніх або внутрішніх чинників, та появи критичних ситуацій таких як розліт уламків лопаток по складовим частинам газотурбінного двигуна, пробую корпусу двигуна або фюзеляжу літального апарату. Рівномірне розподілення напружень за профілем пера лопатки та її замковою частиною пов'язане із забезпеченням заданого рівня пластичності матеріалу. У цьому випадку пластична деформація дозволяє знизити концентрацію напружень у лопатках де їх рівень максимальний або значний. Для забезпечення заданого рівня пластичності та ударної в'язкості, наряду із жароміцністю та втомною витривалістю деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів, що виготовляються із жароміцних нікелевих сплавів свою ефективність продемонструвало модифікування розплаву перед кристалізацією. В цьому випадку відбувається зміна ступеня дисперсності й морфології структурних складових матеріалу під дією невеликої кількості активних домішок. Традиційно для модифікування відповідального жароміцного литва застосовують модифікатори першого й другого роду, а також інокулюючі добавки.

Для підвищення ефективності технологічних заходів, що використовуються при отриманні відповідальних виливків деталей газотурбінних двигунів, застосовують комплексний підхід для більш повної реалізації переваг окремих видів модифікування жароміцних нікелевих сплавів.

Тому роботи по розробці ефективної технології комплексного модифікування жароміцного нікелевого сплаву для виготовлення великогабаритних лопаток авіаційних газотурбінних двигунів великої потужності, що спрямовані на збільшення тривалості ресурсу двигуна в

цілому, є вельми актуальними та потребують спеціального підходу до їх проведення.

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 – $(0,05\% \text{Ti}(\text{C}, \text{N}) + 0,01\% \text{Y} + 5\% \text{CoAl}_2\text{O}_4)$, гарячого ізостатичного пресування та термічної обробки.

2. Вперше отримано структури жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, сформовані під впливом інокулювальної дії керамічної форми на основі алюмінату кобальту та об'ємного модифікування карбонітридами титану і ітрієм. Утворені структури характеризуються зміною морфології карбідної складової із шрифтової на глобулярну, дрібнодисперсною карбонітридних включень, сприятливою морфологією інтерметалідної γ' -фази та її рівномірним розподілом. Ці особливості підтверджені методами оптичної та електронної мікроскопії.

3. Вперше встановлено склад комплексного модифікатору для отримання крупногабаритних виливків із жароміцного сплаву та визначено раціональну кількість його складових – $(0,05\% \text{Ti}(\text{C}, \text{N}) + 0,01\% \text{Y} + 5\% \text{CoAl}_2\text{O}_4)$. 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, який отримано 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 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, що сприяє підвищенню механічних властивостей

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.

Представлена дисертаційна робота Данилова Сергія Миколайовича за своїм змістом повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 136 Металургія галузі знань 13 - Механічна інженерія та предметній області, що визначена освітньо-науковою програмою підготовки докторів філософії зі спеціальності - 136 Металургія.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Металургія».

За результатами розгляду звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння можна зробити висновок, що дисертаційна робота Данилова Сергія Миколайовича є результатом самостійних наукових досліджень здобувача. Робота не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату, запозичень або несанкціонованого використання здобувачем результатів інших авторів. Використані здобувачем ідеї, результати та тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота Данилова Сергія Миколайовича написана українською мовою. Наведені в дисертаційній роботі відомості та представлені дисертантом результати досліджень, логічно розподілені за окремими розділами. Структура дисертаційної роботи забезпечує можливість чітко зрозуміти послідовність етапів виконання досліджень. Наведений графічний матеріал, представлений власними фотографіями і діаграмами у повній мірі відображає результати експериментальних досліджень і статистичної обробки. Зміст дисертаційної роботи викладено послідовно із застосуванням загальноприйнятої технічної термінології, що забезпечує повне розуміння отриманих результатів досліджень.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, містить список використаних літературних джерел і 2 додатки. Загальний обсяг дисертації становить 131 сторінку, зокрема вона має 107 сторінок основного тексту, 41 рисунок, 10 таблиць, 2 додатки, перелік використаних літературних джерел 118 бібліографічних найменувань.

У **вступі** наведене обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі досліджень, а також об'єкт і предмет дослідження, наведені відомості щодо методів досліджень, які застосовані здобувачем при виконанні роботи, сформульовані наукова новизна та практичне значення результатів дослідження, визначений особистий внесок

практичне значення результатів дослідження, визначений особистий внесок здобувача, наведені відомості про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** визначена актуальність роботи, наведені результати аналізу пошкоджень лопаток газотурбінних двигунів в процесі експлуатації та методи регулювання структури жароміцних нікелевих сплавів, котрі сприяють підвищенню показників пластичності та ударної в'язкості лопаток турбіни, а також жароміцності та втомної витривалості. Показано, що для регулювання структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів може бути застосовані наступні технологічні методи впливу на розплав: об'ємне модифікування дисперсними тугоплавкими сполуками, рідкоземельними металами, а також поверхневе модифікування керамічної ливарної форми. Аналіз сучасного стану досліджень виявив ряд невирішених проблем. Зокрема, недостатньо вивчено комплексний вплив модифікаторів різного механізму на структуру та властивості авіаційного жароміцного сплаву й це питання потребує уточнення.

Автор припускає, що саме пластичність впливає на здатність матеріалу релаксувати локальні напруження, чинити опір зародженню та поширенню тріщин, протистояти термічній втомі та міжзеренному руйнуванню й відповідно забезпечувати в лопатках інтенсивну протидію руйнуванню під впливом високого рівня статичних, динамічних і циклічних навантажень в умовах підвищених температур експлуатації. На основі проведеного ретельного аналізу наявних результатів автором запропоновано розглянути вплив наступних технологій модифікування на стан жароміцного сплаву ЖСЗДК-ВІ, що традиційно використовується для виготовлення великогабаритних лопаток авіаційного газотурбінного двигуна великої потужності: об'ємного модифікування дисперсними тугоплавкими сполуками, зокрема карбонітридами титану $Ti(C,N)$, об'ємного модифікування рідкоземельним металом – ітрієм Y , поверхневого модифікування алюмінатом кобальту $CoAl_2O_4$, а також їх одночасного, сумісного, комплексного впливу.

У **другому розділі** наведений опис застосованих стандартних та розроблених автором методик досліджень, характеристики обраних матеріалів, технології виготовлення керамічних форм та введення модифікаторів у розплави, опис технологічного обладнання для реалізації досліджень.

Для досягнення мети та вирішення поставлених у роботі завдань застосовано технологію рівноважного жароміцного литва за витоплюваними моделями, що включає виготовлення модифікованих алюмінатом кобальту керамічних форм, розплавлення навіски жароміцного сплаву у вакуумній плавильній установці та наступне модифікування розплаву дослідними модифікаторами, як окремо, так і в комплексі. Модифікатори вводилися у розплави у брикетованому вигляді ($Ti(C,N)$), та у вигляді нікель-ітрієвої лігатури (Y). Модифіковані розплави зливалися у форми, перший шар котрих, був виготовлений із використанням електрокорунду та/або алюмінату

кобальту. Крім того, автором описана методика проведення випробувань на кут загину для оцінки здатності лопаток сприймати навантаження деформації (вигину) без руйнування.

Третій розділ дисертації присвячений визначенню дослідженню впливу технологій модифікування на структуру та властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ. Зокрема, обґрунтовано вибір модифікаторів для покращення механічних характеристик дослідного жароміцного нікелевого сплаву. На основі літературних даних автор пропонує забезпечити вміст ітрію у виливках при модифікуванні у концентрації 0,01% мас., вміст карбонітриду титану ($Ti(C,N)$) у кількості 0,1%, а алюмінату кобальту у першому робочому шарі керамічної ливарної форми забезпечити на рівні 5%. В роботі зазначається, що раніше проведеними дослідженнями показано ефективність впливу вказаних модифікаторів саме у зазначеному вмісті.

Отримані результати дослідження дозволили визначити, що найбільш перспективною технологією, спрямованою на підвищення та ударної в'язкості виливків із жароміцного нікелевого сплаву є технологія комплексного модифікування жароміцного сплаву – $(Ti(C,N)+Y+CoAl_2O_4)$. Автором запропоновано виконання раціоналізації технологічної схеми модифікування через невисокий рівень жароміцності.

Четвертий розділ дисертації присвячений визначенню раціонального вмісту карбонітриду титану $Ti(C,N)$ при комплексному модифікуванні. Зокрема, автор пропонує для покращення структурного стану жароміцного литва проводити раціоналізацію у напрямку зниження кількості модифікаторів – карбонітриду титану $Ti(C,N)$, що вводяться у розплав та обґрунтовує це необхідністю уникнення утворення в структурі сплаву скупчень карбонітрідів на виливках.

Визначений діапазон раціональних концентрацій модифікатору – карбонітриду титану $Ti(C,N)$, що вводився у розплав при комплексному модифікуванні: 0,025% (мас.); 0,050% (мас.); 0,075% (мас.).

Проведений ретельний аналіз впливу технології комплексного модифікування на структуру та властивості сплаву ЖСЗДК-ВІ показав, що використання у якості модифікаторів 0,050% $Ti(C,N)$, сумісно із 0,01% (мас.) Y та 5% (мас.) $CoAl_2O_4$ забезпечило кращі показники ударної в'язкості та часу до високотемпературного руйнування порівняно із іншими дослідними варіантами. Оскільки ударна в'язкість комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ перевищувала нормативні вимоги більш ніж у два рази, а інші критичні властивості також показали задовільні результати, автор визначив раціональною технологічну схему комплексного модифікування 0,01% Y + 0,050% $Ti(C,N)$ + 5% $CoAl_2O_4$. Цю схему було рекомендовано для промислової апробації в умовах виробництва.

У **п'ятому розділі** представлені результати промислового апробування вдосконалених технологій комплексного модифікування при виготовленні великогабаритних лопаток турбіни вентилятору авіаційного двигуна Д-18Т. Для оцінки інтегральної пластичності лопаток ТВ автором розроблено та використано методику випробування лопаток на кут загину, що заснована на

вимогах стандарту ДСТУ ISO 7438:2005, яка підтвердила достовірність і стабільність результатів.

Втомними випробуваннями визначено границю витривалості комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ – 441 МПа.

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 дисертаційної роботи висвітлені у 6 публікаціях, з них: 5 статей в наукових журналах, з яких 1 стаття входить в наукометричну базу даних Scopus і 5 статей в журналі з індексом цитування. Результати дисертації пройшли апробацію на 8 міжнародних наукових фахових конференціях з ливарного виробництва, металургії, матеріалознавства.

При підготовці дисертації автор дотримувався 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 і повністю висвітлені у його наукових публікаціях.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В літературному огляді не наведено жодної таблиці; для кращої систематизації причин руйнування лопаток, або розгляду питання підвищення експлуатаційних характеристик, краще було б декотрі дані навести у табличному вигляді.

2. У висновках до розділу 3 зазначається, що дослідні технології забезпечили суттєве подрібнення макроструктури порівняно із варіантом без модифікування. Незрозуміло навіщо подрібнювати зерно в жароміцних нікелевих сплавах, адже загальновідомо, що підвищення жароміцності пов'язане із забезпеченням в структурі крупнозернистої структури. При подрібненні зерна збільшується сумарна протяжність меж зерен і при підвищених температурах та рівні навантажень це полегшує зерномежове проковзування в умовах високотемпературної повзучості.

3. На основі отриманих в роботі результатів випробувань механічних властивостей та підрахунку розмірів структурних складових бажано б було зробити оптимізацію та встановити залежності, які б характеризували вплив вмісту карбонітриду титану $Ti(C,N)$, що вводиться у розплав у визначених кількостях, на параметри структурних складових та механічні властивості, або, наприклад, визначити взаємозв'язок між параметрами структури (розмірами та кількістю) карбідної й карбонітридної складових або γ' -фази та властивостями, особливо ударною в'язкістю та жароміцністю.

4. В роботі є ряд стилістичних недосконалостей викладення матеріалу, зокрема не на всіх рисунках вказані збільшення, присутні тавтологічні обороти в тексті, наявні дуже довгі речення й т.ін.

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

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, 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, вона не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, а сукупність її теоретичних та практичних результатів розв'язує наукове завдання, як має вагоме значення для галузі знань Механічна інженерія. Дисертаційна робота за своєю актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, які наведені 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 Данилов Сергій Миколайович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія.

Офіційний опонент:

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

Юлія КВАСНИЦЬКА

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

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



Володимир ЛАХНЕНКО