**ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Пучека Сергія Володимировича**

на тему «**Узагальнення закономірностей формування структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів для виготовлення відповідальних деталей газотурбінних двигунів**»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань **13 Механічна інженерія**

за спеціальністю **132 Матеріалознавство**

**Актуальність теми дисертації.**

Дисертаційне дослідження Пучека Сергія Володимировича присвячене узагальненню результатів комплексу теоретичних та практичних досліджень закономірностей формування структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ, які широко використовуються в турбінах високого тиску газотурбінних двигунів та установок (ГТД та ГТУ). Забезпечення підвищених експлуатаційних характеристик матеріалів деталей гарячого тракту та, в цілому, ресурсу двигунів за рахунок підвищення комплексу службових характеристик існуючих промислових сплавів шляхом додаткового легування та модифікування та застосування нових технологічних операцій, що розглядається автором, робить тему дисертації беззаперечно актуальною для авіаційного матеріалознавства.

**Оцінка обґрунтованості наукових результатів, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна отриманих результатів дисертації полягає у наступному:

1. Вперше узагальнено закономірності формування раціональної структури, що забезпечує високий рівень властивостей зразків та робочих лопаток газотурбінних двигунів із жароміцних нікелевих сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ, отриманих з використанням мікролегування, високотемпературної

обробки розплаву (ВТОР), гарячого ізостатичного пресування (ГІП) та термічної обробки.

2. З використанням комплексу розрахунково-аналітичних досліджень визначено найважливіші параметри, що характеризують структуру та фазову стабільність досліджуваних сплавів, а саме основні температурні параметри, кількість зміцнюючої γ′-фази, границі короткочасної та тривалої міцності на різних рівнях легування.

3. Отримали подальший розвиток науково-практичні уявлення про можливість застосування різних технологічних процесів (модифікування, високотемпературної обробки розплаву, гарячого ізостатичного пресування, термічної обробки) при виплавлені жароміцних сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ та виготовленні з них відповідальних деталей ГТД.

Показано, що об'ємне модифікування сплаву ЖС32-ВІ Ni-Y лігатурою сприяло підвищенню механічних властивостей з отриманням більш стабільних показників.

Наукові результати дисертації мають високий рівень обґрунтованості та узгоджуються з усталеними науковими концепціями. Це підтверджено поєднанням теоретичного моделювання (PHACOMP, New PHACOMP, КРАМ) та експериментальних досліджень. Отримали подальший розвиток уявлення про аспекти впливу модифікування Ni-Y лігатурою, проведення високотемпературної обробки розплаву та термічної обробки, морфологію зміцнюючої фази та механічні властивості сплавів.

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

Дисертаційна робота Пучека Сергія Володимировича написана українською мовою.

Робота відзначається логічною структурою, послідовністю викладу матеріалу, узгодженістю методичних підходів та чітким науковим стилем. Присутні всі ключові етапи – від аналізу літератури до практичної апробації результатів. Структура дисертації є традиційною: вступ, п'ять розділів

дослідження, загальні висновки, список джерел та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 178 сторінок, зокрема: 161 сторінка основного тексту дисертації, 61 рисунок, 47 таблиць, 2 додатка та перелік використаних літературних джерел із 126 бібліографічних найменувань.

Принципи академічної доброчесності дотримано: результати супроводжені достовірними посиланнями. Основна частина матеріалів оприлюднена в рецензованих виданнях та науково-технічних конференціях. Автор чітко декларує особистий внесок, а використання літературних джерел є обґрунтованим та коректним.

**Вступ.**

Вступ дисертації витриманий в класичному стилі технічних матеріалознавчих досліджень: логічний, структурно чіткий, академічно обґрунтований. У ньому автор обґрунтовує актуальність теми, вказуючи на необхідність подальшого узагальнення комплексу даних щодо структури та властивостей жароміцних сплавів, зокрема з урахуванням вимог до відповідальних деталей ГТД. Мова вступу технічно коректна. Автор використовує загально прийняту професійну термінологію з дотриманням академічної етики стилю. Наведено мету, завдання дослідження, об'єкт і предмет дослідження, а також сформульовано наукову новизну та практичне значення. Усі формулювання чіткі, логічно пов'язані, без стилістичних помилок. Загалом вступ добре орієнтований на цільову аудиторію – фахівців з матеріалознавства, і слугує надійною основою для сприйняття наступних розділів.

**Розділ 1. Вплив легування та теплової обробки на фізико-механічні та експлуатаційні властивості жароміцних нікелевих сплавів.**

Розділ присвячено ретельному літературному огляду та аналізу існуючих матеріалів, що використовують для виготовлення лопаток ГТД. Автор розглядає особливості конструкції газотурбінних двигунів та

газотурбінних установок, умови роботи лопаточного апарату. Розглянуто питання впливу хімічного складу, роль топологічно щільноупакованих фаз та мікролегувальних елементів в формуванні структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів. Стиль цього розділу – науково оглядовий, інформативний і термінологічно точний. Ключові технічні терміни використані конкретно з посиланням на літературні джерела. Окрему увагу приділено питанням впливу температурної обробки (високотемпературна обробка розплаву, термічна обробка). Охарактеризована роль легуючих елементів в забезпеченні поверхневої стабільності сплавів. Розділ написано структуровано, з чітким поділом на підрозділи, що полегшує орієнтацію в матеріалі. Чітко визначено мету, об'єкт та предмет дослідження.

**Розділ 2. Матеріали і методика досліджень.**

Цей розділ має прикладний характер, написаний в інженерно-аналітичному стилі. Автор докладно описує, як проводились експерименти з вказанням використаного обладнання та застосованих методик. Зокрема, зазначено моделі сучасних вакуумних плавильних установок (FM-1-2-100 фірми ULVAC та вітчизняних – УВНК-8П, УВНК-9А та УППФ-3М), оптичного мікроскопа «Carl Zeiss», сучасних приладів спектрального аналізу (ARL-4460, JSMT-300) та приладів для випробувань (ДСТ-500, ZDMY30).

Наведена методика визначення характеристичних температур нікелевих сплавів за допомогою диференційного термічного аналізу. В цілому, стиль цього розділу – функціональний, який повністю відповідає завданню створити чітку уяву про методику, яку можна повторити чи перевірити.

**Розділ 3. Визначення показників стабільності дослідних сплавів за допомогою аналітико-експериментальних методів.**

З використанням відомих розрахунково-аналітичних методів (PHACOMP, New PHACOMP) та розробленої в НУ «Запорізька політехніка» комплексної методики (КРАМ) проведено комплекс розрахунково-аналітичних досліджень та визначено найважливіші параметри, що

характеризують структурну та фазову стабільність ливарних жароміцних нікелевих сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ. Визначено основні температурні параметри, кількість основної зміцнюючої γ′-фази, границя короткочасної та тривалої міцності досліджуваних сплавів на різних рівнях легування.

Отримані результати свідчать про достатню стабільність сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ та можливість широкого застосування обох сплавів для виготовлення відповідальних деталей ГТД з застосуванням мікролегування та різних видів теплової обробки (ВТОР, термічна обробка).

На підставі даних диференціального барометричного аналізу встановлено баричні коефіцієнти характеристичних температур багатокомпонентних нікелевих сплавів.

**Розділ 4. Оцінка структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ як перспективних матеріалів для виготовлення лопаток авіаційних газотурбінних двигунів.**

Розділ має прикладну спрямованість, містить результати дослідження структури та властивостей досліджуваних сплавів на зразках, виготовлених на АТ «Мотор Січ». Зміст цього розділу структурований за впливами: на макроструктуру, мікроструктуру до та після термічної обробки, механічні та жароміцні властивості (як у нетермообробленому, так і термообробленому стані).

Мікроструктура досліджених зразків серії експериментальних плавок сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ ідентична і до термообробки являє собою γ-твердий розчин, з наявністю інтерметалідної γ′-фази, евтектичної (γ-γ′) фази, карбідів та карбонітридів. У структурі всіх досліджуваних плавок виявлено скелетоподібні виділення карбоборидної евтектики.

Гаряче ізостатичне пресування та термічна обробка практично повністю усувають внутрішню мікропористість. В структурі досліджених зразків всіх плавок спостерігаються виділення карбідів та карбонитридів у вигляді дрібних частинок, що переважно розподілені рівномірно в обсязі матеріалу. Об'ємне

модифікування сплаву ЖС32-ВІ Ni-Yлігатурою сприяло підвищенню механічних властивостей.

Досліджено технологію отримання сплаву ЖС32-ВІ з використанням свіжих матеріалів без введення вуглецю, що дозволило рекомендувати виплавки дослідних плавок безвуглецевих жароміцних сплавів нового покоління власного виробництва АТ «Мотор Січ».

**Розділ 5. Оцінка якості матеріалів робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів, відлитих з жароміцних нікелевих сплавів.**

Результати проведених досліджень показали, що якість матеріалу робочих лопаток, отриманих литтям із жароміцних нікелевих сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ з використанням гарячого ізостатичного пресування та подальшої термічної обробки за стандартним режимом відповідає встановленим нормативним вимогам.

Основними структурними складовими є γ-твердий розчин з наявністю інтерметалідної γ′-фази, карбідів, карбонітридів, що відповідає структурі сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ у термообробленому стані та прийнятій шкалі мікроструктур.

У процесі ГІП лопатки при температурі 1250 °С та тиску 170 МПа відбувається залікування мікропор та рихлот, що не виходять на поверхню деталей (знаходяться у внутрішніх об'ємах металу). Розмір виявлених після ГІП одиноких мікропор у 100…300 разів менше у порівнянні з порами, виявленими в лопатках до проведення операції ГІП.

Механічні та жароміцні властивості досліджених сплавів на зразках, вирізаних з пера та замка лопаток, однакові та перевищують вимоги ТУ на поставку лопаток. Границя витривалості досліджуваної партії лопаток, виготовлених зі сплаву ЖС32-ВІ, на 22 % перевищує вимоги технічної документації.

Оптимальну структуру зразків та лопатки мають після ГІП та низькотемпературного старіння.

**Загальні висновки.**

Зміст висновків охоплює всі ключові моменти проведеного комплексу досліджень.

Основний загальний висновок полягає в досягнені поставленої мети дослідження. За рахунок узагальнення сучасних науково-прикладних уявлень отримано комплекс експериментальних даних щодо механічних властивостей при нормальних та підвищених температурах, тривалої міцності та втомних характеристик жароміцних нікелевих сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ, що дає можливість їх поширеного використання в авіаційному газотурбобудуванні з забезпеченням підвищеної довговічності сплавів при виготовленні робочих лопаток турбін.

**Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.**

Автор опублікував п'ять наукових статей, всі вони у фахових наукових журналах, затверджених «Переліком…» (категорія Б). Це є достатнім для підтвердження апробації результатів. Крім того, результати доповідались на трьох науково-технічних конференціях. Оприлюднення охоплює всі основні аспекти роботи і аналітичні розрахунки, застосування ВТОР, модифікування, вплив режимів термічної обробки.

У процесі роботи над дисертацією автор керувався нормами наукової доброчесності. Представлені ним дослідницькі матеріали спираються 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 до дисертаційної роботи.**

1. Доцільно було б представити порівняльний аналіз властивостей дослідних сплавів з сучасними закордонними аналогами (наприклад з серії сплавів Inconel, Rene, MAR-M тощо).

2. В роботі не надано докладної інформації про тривалість експлуатації лопаток, виготовлених за серійною технологією.

3. В розділі 3 не показано, чи можна розширювати діапазон концентрації легуючих елементів за межи досліджуваних інтервалів.

4. Доцільним було б більш докладно висвітлити механізм впливу ВТОР на формування матриці та структурних компонентів досліджуваних сплавів.

5. У тексті наявні поодинокі випадки непослідовності у вживанні термінології, що ускладнює сприйняття. Наявні стилістичні неточності та орфографічні помилки.

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

**Висновок про дисертаційну роботу.**

Дисертаційна робота Сергія Володимировича Пучека на тему «Узагальнення закономірностей формування структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів для виготовлення відповідальних деталей газотурбінних двигунів» є завершеним, самостійним, комплексним науковим дослідженням, яке робить суттєвий внесок в галузь матеріалознавства жароміцних сплавів для відповідальних деталей ГТД. В роботі отримано та узагальнено масиви нових даних щодо забезпечення заданих механічних властивостей та довговічності сплавів за рахунок комбінованого впливу модифікування, ВТОР та режиму термообробки. Результати мають прикладний характер, належно апробовані та оприлюднені, використані у промисловому виробництві та впроваджені у навчальний процес НУ «Запорізька політехніка». Автор продемонстрував глибоке розуміння сучасних технологій виготовлення жароміцних сплавів та здатність до їх наукового розвитку.

Представлена дисертаційна робота відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в пп. 6-9 «Порядку присудження

ступеня 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 Пучек Сергій Володимирович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

**Офіційний опонент:**

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

Підпис офіційного опнента,
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

Національна академія наук України
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ
Ідентифікаційний код 05417153
м. Київ