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 дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Пучека Сергія Володимировича присвячена актуальній науково-прикладній проблемі матеріалознавства, пов'язаній із забезпеченням високого рівня фізико-механічних і експлуатаційних властивостей жароміцних нікелевих сплавів, що використовуються для виготовлення відповідальних деталей газотурбінних двигунів, насамперед робочих лопаток першого ступеня турбіни високого тиску.

Актуальність обраної теми визначається постійним зростанням вимог до надійності, довговічності та працездатності елементів гарячого тракту газотурбінних двигунів, які експлуатуються в умовах одночасної дії високих температур, значних механічних і термічних навантажень, агресивного газового середовища та циклічної зміни режимів роботи. За таких умов матеріал робочих лопаток повинен характеризуватися не лише високою короткочасною і тривалою міцністю, а й достатньою пластичністю, опором втомному руйнуванню, структурною стабільністю та стійкістю до високотемпературної деградації.

Особливого значення набуває пошук технологічних способів підвищення експлуатаційних характеристик уже освоєних промисловістю жароміцних нікелевих сплавів. Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є комплексне використання легування, модифікування розплаву, високотемпературної обробки, гарячого ізостатичного пресування та подальшої термічної обробки. Водночас ефективність такого підходу значною мірою залежить від розуміння взаємозв'язку між хімічним складом, фазовими перетвореннями, структурним станом і механічними характеристиками матеріалу.

У цьому контексті дослідження закономірностей формування структури та властивостей сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ має істотне наукове й практичне значення. Важливим аспектом роботи є те, що автор не обмежується дослідженням лабораторних

зразків, а поширює експериментальні дослідження на реальні виливки робочих лопаток газотурбінних двигунів. Це дає змогу розглядати отримані результати не лише з позицій фундаментального матеріалознавства, а й з погляду їх застосування у виробничих умовах.

Слід також відзначити актуальність досліджень, спрямованих на вдосконалення технології виплавляння жароміцних нікелевих сплавів із використанням свіжих шихтових матеріалів без додаткового введення вуглецю. Цей напрям становить інтерес для розвитку вітчизняного авіаційного двигунобудування та розширення технологічних можливостей виробництва відповідальних литих деталей.

Таким чином, обрана тема дисертаційної роботи є актуальною, має чітко виражену науково-прикладну спрямованість, а її дослідження відповідає сучасним завданням розвитку матеріалознавства та технологій виготовлення відповідальних деталей машин.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Дисертаційна робота має логічну структуру та складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків і списку використаних джерел. Її зміст відображає послідовний перехід від аналізу сучасного стану проблеми та обґрунтування методів дослідження до експериментального вивчення структури, властивостей і технологічних особливостей виготовлення робочих лопаток.

У **першому розділі** автором здійснено аналіз умов експлуатації робочих лопаток газотурбінних двигунів, особливостей хімічного складу жароміцних нікелевих сплавів, ролі легувальних і мікролегувальних елементів у формуванні їх структури та властивостей. Розглянуто вплив температурної обробки на структурний стан матеріалів, утворення інтерметалідних і топологічно щільноупакованих фаз, а також чинники, що визначають жароміцність і поверхневу стабільність сплавів.

Проведений аналіз літературних джерел дав змогу авторові обґрунтувати необхідність комплексного дослідження впливу хімічного складу та технологічних параметрів на властивості жароміцних нікелевих сплавів. Сформульовані мета й завдання дослідження загалом відповідають тематиці дисертації.

Другий розділ присвячено характеристиці дослідних матеріалів і методик проведення експериментів. Для дослідження використано технології вакуумної виплавки, лиття за витоплюваними моделями, гарячого ізостатичного пресування та термічної обробки. Комплекс експериментальних методів охоплює визначення хімічного складу, дослідження макро- та мікроструктури, рентгеноспектральний мікроаналіз, механічні випробування за кімнатної та підвищених температур, визначення тривалої міцності та втомних характеристик.

Використання комплексу взаємодоповнювальних методів є суттєвою перевагою роботи, оскільки дає змогу досліджувати матеріали на різних структурних рівнях і зіставляти результати структурного аналізу з показниками механічних властивостей.

У **третьому розділі** наведено результати розрахунково-аналітичної оцінки структурної та фазової стабільності сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ. Визначено температурні параметри, розрахункову кількість зміцнювальної γ′-фази, а також оцінено характеристики короткочасної та тривалої міцності за різних рівнів легування. Окрему увагу приділено визначенню характеристичних температур за допомогою диференціального баритермічного аналізу.

Важливим результатом цього етапу є комплексна оцінка фазової стабільності досліджуваних сплавів, яка надалі використовується для інтерпретації експериментальних результатів.

Четвертий розділ містить результати досліджень структури та властивостей зразків сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ, зокрема після високотемпературної обробки розплаву, гарячого ізостатичного пресування та термічної обробки. Особливий інтерес становлять результати дослідження впливу об'ємного модифікування сплаву ЖС32-ВІ нікель-ітрієвою лігатурою. Показано, що застосування такого модифікування сприяє подрібненню зерна та зміні комплексу механічних властивостей.

Окремим напрямом дослідження є вивчення можливості отримання безвуглецевого жароміцного нікелевого сплаву, що розширює технологічну спрямованість дисертаційної роботи.

П'ятий розділ має особливу практичну цінність, оскільки присвячений дослідженню структури та властивостей безпосередньо робочих лопаток газотурбінних двигунів, виготовлених зі сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ. Автором досліджено вплив гарячого ізостатичного пресування та подальшої термічної обробки на структурний стан матеріалу, його механічні характеристики, тривалу міцність і опір втомному руйнуванню.

Важливим результатом є встановлення того, що гаряче ізостатичне пресування сприяє зменшенню мікропористості, проте може супроводжуватися структурною неоднорідністю внаслідок формування локальних ділянок рафт-структури та коагуляції γ′-фази. Показано, що подальша термічна обробка дає змогу частково усунути ці структурні неоднорідності та забезпечити стабілізацію властивостей.

Отже, послідовність проведених досліджень, використані методи та наведені експериментальні результати загалом забезпечують обґрунтованість основних наукових положень дисертації. Особливо слід відзначити поєднання розрахунково-аналітичних досліджень із експериментальною перевіркою на матеріалах і готових виробах.

Наукова новизна одержаних результатів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в узагальненні закономірностей формування структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ з урахуванням комплексного впливу легування, модифікування та технологічних параметрів їх обробки.

До найбільш суттєвих наукових результатів роботи слід віднести:

1. Розвиток уявлень про закономірності формування структурного стану жароміцних нікелевих сплавів за комплексного впливу мікролегування, високотемпературної обробки розплаву, гарячого ізостатичного пресування та термічної обробки. Особливе значення має дослідження взаємозв'язку між фазовим складом, морфологією структурних складових та механічними властивостями матеріалів.

2. Проведення комплексної розрахунково-аналітичної оцінки структурної та фазової стабільності сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ з визначенням характеристичних температур, кількості зміцнювальної γ′-фази та розрахункових показників міцності. Отримані результати створюють підгрунтя для подальшого вдосконалення технологічних параметрів виробництва цих матеріалів.

3. Встановлення впливу об'ємного модифікування сплаву ЖС32-ВІ нікель-ітрієвою лігатурою на структурні характеристики та механічні властивості. Заслуговує на увагу виявлене подрібнення макрозерна та підвищення стабільності окремих механічних показників, хоча цей ефект супроводжується певними змінами характеристик тривалої міцності.

4. Уточнення закономірностей структурних змін у матеріалах робочих лопаток під час гарячого ізостатичного пресування та подальшої термічної обробки. Особливий інтерес становить встановлений взаємозв'язок між заліковуванням внутрішніх пор, формуванням локальних ділянок рафт-структури, перерозподілом γ′-фази та зміною механічних властивостей.

5. Отримання експериментальних результатів щодо впливу технологічних режимів на втомні характеристики робочих лопаток зі сплаву ЖС32-ВІ(ВСК). Зокрема, для дослідженої партії лопаток визначено границю витривалості 220 МПа, що перевищує зазначену в роботі нормативну вимогу на 22 %.

Загалом наукова новизна роботи визначається комплексним характером досліджень, поєднанням аналітичних і експериментальних методів та поширенням результатів дослідження з лабораторних зразків на реальні робочі лопатки газотурбінних двигунів.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в можливості використання отриманих результатів для вдосконалення технологічних процесів виготовлення відповідальних деталей газотурбінних двигунів із жароміцних нікелевих сплавів.

Особливої уваги заслуговують експериментально обґрунтовані результати застосування гарячого ізостатичного пресування за температури 1250 °С і тиску 170 МПа для зменшення мікропористості литих робочих лопаток. Важливим практичним результатом є також встановлення необхідності подальшої термічної обробки, яка сприяє підвищенню структурної однорідності та поліпшенню пластичних характеристик матеріалу.

Цінність роботи полягає в тому, що автор дослідив не лише позитивний вплив зазначених технологічних операцій, а й можливі негативні наслідки їх застосування, зокрема формування локальних структурних неоднорідностей та нестабільність окремих механічних характеристик за певних режимів обробки. Такий підхід має практичне значення для вибору технологічних режимів, які забезпечують необхідне поєднання міцності, пластичності та жароміцності.

Важливим результатом є дослідження впливу модифікування нікель-ітрієвою лігатурою на властивості сплаву ЖС32-ВІ, що може бути використано під час подальшого вдосконалення технології отримання литих деталей.

Окремо слід відзначити практичну апробацію результатів дисертаційної роботи на підприємстві АТ «Мотор Січ» під час виконання проєкту з виготовлення плавки жароміцного сплаву ЖС32бс-ВІ зі свіжих шихтових матеріалів без додаткового введення вуглецю. Наявність відповідного акта впровадження свідчить про виробничу спрямованість проведених досліджень.

Практичну значущість також має використання результатів роботи в освітньому процесі Національного університету «Запорізька політехніка» під час викладання дисциплін бакалаврського, магістерського та освітньо-наукового рівнів.

Таким чином, результати досліджень мають потенціал практичного використання у виробництві відповідальних литих деталей, а також у подальших наукових розробках, спрямованих на підвищення надійності та довговічності газотурбінних двигунів.

Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи висвітлено у восьми наукових публікаціях, з яких п'ять статей опубліковано у фахових наукових виданнях категорії Б, а три роботи представлені у вигляді тез доповідей на науково-технічних конференціях.

Тематика опублікованих праць відповідає основним напрямам дисертаційного дослідження та охоплює питання структури, властивостей і технологічних особливостей жароміцних нікелевих сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ. Основні результати роботи також апробовано на науково-технічних конференціях.

Відомості про особистий внесок здобувача наведено в дисертації. Автором обґрунтовано методологію проведення експериментальних досліджень, здійснено комплекс вимірювань, аналітичних і числових розрахунків за безпосередньої участі в експериментальній роботі.

Зауваження та дискусійні положення.

Попри значний обсяг проведених досліджень, їх наукову та практичну цінність, дисертаційна робота містить окремі положення, які потребують додаткового обґрунтування або уточнення. Наведені зауваження мають переважно дискусійний характер і стосуються повноти інтерпретації окремих результатів, методології досліджень та формулювання висновків.

1. Щодо формулювання наукової новизни. У роботі заявлено узагальнення закономірностей формування структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів. Водночас частина результатів має характер експериментального встановлення впливу окремих технологічних операцій на структурний стан і механічні властивості. Доцільно було б чіткіше розмежувати результати, які становлять принципово нові наукові положення, та результати, що підтверджують або розширюють уже відомі закономірності.

2. У дисертації досліджено високотемпературну обробку розплаву, модифікування, гаряче ізостатичне пресування та термічну обробку. Проте для глибшого розуміння внеску кожного з цих факторів у формування кінцевих властивостей доцільно було б детальніше представити кількісне порівняння їхнього самостійного та комплексного впливу. Особливо важливим є розмежування ефектів, зумовлених зміною хімічного складу, та ефектів, пов'язаних із технологічною обробкою.

3. У третьому розділі наведено результати розрахунків температурних параметрів, кількості γ′-фази та показників міцності. Водночас доцільно було б докладніше обґрунтувати межі застосування використаних розрахункових методик і ступінь їх відповідності експериментальним даним, особливо за наявності складної багатокомпонентної системи легування.

4. У роботі показано позитивний вплив нікель-ітрієвої лігатури на подрібнення зерна та окремі механічні властивості сплаву ЖС32-ВІ. Разом із тим встановлено певне зниження тривалої міцності. На нашу думку, доцільно було б докладніше розглянути

механізми цього явища та встановити, якою мірою зміна властивостей пов'язана саме з модифікуванням, а якою — з особливостями подальшої термічної обробки.

5. Одним із важливих результатів роботи є встановлення позитивного впливу гарячого ізостатичного пресування на зменшення мікропористості. Водночас у матеріалі після ГІП спостерігаються локальні ділянки рафт-структури, скоагульовані частинки γ′-фази та структурна неоднорідність. Доцільно було б глибше розкрити механізми формування таких структурних особливостей і докладніше обгрунтувати умови, за яких позитивний вплив ГІП переважає його можливі негативні наслідки.

6. У роботі наведено результати випробувань робочих лопаток зі сплавів ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ, зокрема встановлено перевищення нормативного значення границі витривалості для дослідженої партії лопаток зі сплаву ЖС32-ВІ. Водночас було б доцільно детальніше представити статистичну оцінку розкиду результатів, довірчі інтервали та вплив структурної неоднорідності й кристалографічної орієнтації на опір втомному руйнуванню. Це дало б змогу повніше оцінити відтворюваність отриманих характеристик.

7. У дисертації значну увагу приділено механічним характеристикам, тривалій міцності та втомним властивостям дослідних матеріалів. Разом із тим для підтвердження можливості прогнозування ресурсу відповідальних деталей доцільно було б ширше розглянути зв'язок отриманих лабораторних характеристик із фактичними умовами тривалої експлуатації лопаток, зокрема з урахуванням спільної дії температурних, механічних та корозійних чинників.

8. У роботі наведено результати дослідження технології отримання сплаву ЖС32-ВІ без додаткового введення вуглецю. Цей напрям є перспективним, однак для оцінювання його виробничої доцільності було б корисним ширше висвітлити вплив зміни вмісту вуглецю на фазовий склад, морфологію карбідів, механічні характеристики та стабільність властивостей матеріалу.

9. Отримані результати мають практичну спрямованість, проте рекомендації щодо застосування окремих технологічних режимів доцільно було б систематизувати у вигляді узагальненої таблиці з чітким зазначенням досліджуваного сплаву, вихідного структурного стану, режиму обробки, очікуваних структурних змін та характеристик, які забезпечуються після обробки.

Наведені зауваження не заперечують наукової та практичної цінності виконаної роботи, а визначають окремі напрями подальшого поглиблення досліджень.

Загальна оцінка дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Пучека Сергія Володимировича є завершеним науковим дослідженням, присвяченим важливій проблемі формування структури та властивостей

жароміцних нікелевих сплавів для виготовлення відповідальних деталей газотурбінних двигунів.

До основних позитивних сторін роботи слід віднести:

- актуальність обраної наукової проблеми та її безпосередній зв'язок із потребами сучасного двигунобудування;
- комплексний підхід до дослідження впливу хімічного складу та технологічних параметрів на структурний стан і властивості жароміцних нікелевих сплавів;
- поєднання розрахунково-аналітичних методів із широким комплексом експериментальних досліджень;
- дослідження не лише лабораторних зразків, а й реальних робочих лопаток газотурбінних двигунів;
- встановлення особливостей впливу гарячого ізостатичного пресування та подальшої термічної обробки на структуру й механічні характеристики матеріалів;
- практичну спрямованість отриманих результатів, підтверджену їх використанням у виробничому проєкті АТ «Мотор Січ» та в освітньому процесі;
- належне висвітлення основних результатів дослідження в наукових публікаціях.

Зміст дисертації свідчить про значний обсяг виконаної здобувачем експериментальної роботи, володіння сучасними методами дослідження металевих матеріалів та вміння аналізувати взаємозв'язок між структурними характеристиками й фізико-механічними властивостями.

Висловлені зауваження стосуються переважно глибини інтерпретації окремих результатів, деталізації механізмів структуроутворення та повноти обґрунтування деяких положень. Вони не змінюють загальної позитивної оцінки проведеного дослідження.

Висновок про дисертаційну роботу.

Загалом дисертаційна робота Пучека Сергія Володимировича має актуальну науково-прикладну спрямованість, відповідає проблематиці спеціальності 132 «Матеріалознавство», містить експериментальні дослідження структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів, результати модифікування, ВТОР, ГІП та термічної обробки. У роботі простежується зв’язок між технологічними параметрами, структурним станом та властивостями матеріалу. Практична значущість підтверджується використанням результатів на АТ «Мотор Січ» та в освітньому процесі. Здобувач продемонстрував глибоке володіння сучасними методами дослідження, технологіями виплавки жароміцних нікелевих сплавів та застосування ВТОР та термічної обробки для

забезпечення високого рівня фізико-механічних властивостей. Матеріали дисертації свідчать про наявність у здобувача аналітичного мислення, здатності до узагальнення та формування обґрунтованих висновків. Результати оприлюднені у фахових виданнях, пройшли апробацію на наукових конференціях і мають визнання у виробничих умовах.

Дисертаційна робота здобувача відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачено в пп. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

Робота заслуговує на схвальну оцінку, а її автор Пучек Сергій Володимирович – на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент:

Завідувачка кафедри інженерії матеріалів
і цифрового виробництва
ім. О.М. Петриченка Харківського
національного автомобільно-дорожнього
університету (ХНАДУ),
доктор технічних наук, професор — Діана ГЛУШКОВА

Підпис
д.т.н., професора Діани Глушкової засвідчую

