

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Глотки Олександра Анатолійовича

**«Науково-технологічні основи оптимізації процесів легування  
нікелевих сплавів для підвищення ресурсу газотурбінних двигунів»,**

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство

**Актуальність дисертаційної роботи** Глотки Олександра Анатолійовича на тему «Науково-технологічні основи оптимізації процесів легування нікелевих сплавів для підвищення ресурсу газотурбінних двигунів» не викликає сумнівів і визначається сучасними вимогами до підвищення надійності, довговічності та ефективності газотурбінної техніки. Особливої значущості ця проблематика набуває в умовах розвитку високотехнологічного машинобудування та необхідності створення матеріалів, здатних тривало працювати за високих температур, механічних навантажень і агресивного газового середовища.

Жароміцні нікелеві сплави є одними з ключових конструкційних матеріалів сучасного газотурбобудування, оскільки саме від їх структурного стану, фазового складу, механічних, теплофізичних і корозійних властивостей значною мірою залежать експлуатаційні характеристики та ресурс відповідальних деталей газотурбінних двигунів. При цьому підвищення робочих температур газотурбінних установок висуває дедалі жорсткіші вимоги до оптимізації хімічного складу та структури таких матеріалів.

Важливою особливістю досліджуваної проблеми є складність багатокomпонентних систем легування жароміцних нікелевих сплавів. Зміна концентрації окремих легувальних елементів може одночасно впливати на фазоутворення, теплофізичні, механічні та корозійні характеристики матеріалу. Саме ця наукова проблема обґрунтовує необхідність комплексного підходу до оптимізації складу жароміцних нікелевих сплавів.

Особливо актуальним є запропонований у роботі підхід, що поєднує теоретичне термодинамічне моделювання, математичний аналіз та експериментальні дослідження. Розробка залежностей між хімічним складом сплаву, його структурно-фазовим станом і комплексом експлуатаційних властивостей створює можливість не лише пояснювати закономірності формування властивостей, а й прогнозувати їх та обґрунтовано здійснювати вибір складу матеріалу.

Суттєво посилює актуальність роботи її прикладна спрямованість. Автором розроблено алгоритм прогнозування комплексу властивостей жароміцних нікелевих сплавів та здійснено його промислову апробацію. Зазначений результат підтверджує безпосередній зв'язок виконаних фундаментальних досліджень із потребами сучасного газотурбобудування.

Таким чином, дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-прикладної проблеми матеріалознавства, пов'язаної з науково обгрунтованою оптимізацією легування жароміцних нікелевих сплавів, прогнозуванням їх структурно-фазового стану та комплексу експлуатаційних властивостей. Враховуючи наукову новизну, комплексність проведених досліджень, практичну спрямованість отриманих результатів та їх значення для підвищення ресурсу відповідальних деталей газотурбінних двигунів, тему дисертаційної роботи слід вважати безумовно актуальною та своєчасною.

#### **Обгрунтованість наукових результатів дисертації, їх достовірність та новизна**

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі Глотки Олександра Анатолійовича, є достатньо обгрунтованими та логічно випливають із поставленої мети, завдань і результатів проведених теоретичних та експериментальних досліджень.

Обгрунтованість отриманих результатів забезпечується комплексним характером досліджень, у межах яких поєднано аналіз закономірностей впливу хімічного складу на структурно-фазовий стан жароміцних нікелевих сплавів, математичне моделювання, статистичну обробку експериментальних даних та безпосередні матеріалознавчі дослідження. Автором встановлено залежності між хімічним складом сплавів та характеристиками, які визначають їх працездатність в умовах експлуатації. На цій основі отримано регресійні моделі для прогнозування комплексу властивостей та реалізовано підхід до оптимізації складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів без проведення значної кількості попередніх експериментів.

Достовірність наукових результатів підтверджується застосуванням апробованих методів дослідження, зокрема рентгеноспектрального мікроаналізу, оптичної та електронної мікроскопії, механічних випробувань, а також використанням сертифікованого дослідницького обладнання. Важливим чинником достовірності є достатнє статистичне поле експериментальних даних, застосування сучасних методів фізико-хімічного та математичного моделювання, коректна математична обробка результатів та їх зіставлення із загальновідомими положеннями матеріалознавства. Додатковим підтвердженням достовірності є апробація результатів на науково-технічних конференціях, проведення лабораторних і промислових досліджень та практичне впровадження отриманих результатів.

**Наукова новизна** дисертації полягає насамперед у комплексному розвитку науково-технологічних основ оптимізації легування ливарних жароміцних нікелевих сплавів із урахуванням їх структурно-фазового стану, теплофізичних характеристик, механічних та корозійних властивостей. Автором запропоновано новий концептуальний підхід до прогнозування комплексу властивостей сплавів на основі встановлених закономірностей розподілу легувальних елементів та математичних моделей.



Суттєвим науковим результатом є встановлення закономірностей впливу хімічного складу на формування та морфологію карбідних фаз у жароміцних нікелевих сплавах. Цей напрям досліджень послідовно розвивається в роботі та підтверджується відповідними публікаціями автора щодо вторинних карбідів, розподілу легувальних елементів у карбідах і впливу хімічного складу на їх морфологію та тип.

Новизна роботи також пов'язана із встановленням залежностей критичних температур багатокомпонентних нікелевих сплавів від їх атомно-фазового стану та розробленням наукових підходів до оптимізації основних критичних температур жароміцних нікелевих сплавів.

Важливим результатом є розроблення співвідношень, призначених для оптимізації складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів, а також відповідного алгоритму конструювання та удосконалення їх хімічного складу.

Наукові результати мають не лише теоретичне, а й виражене практичне підтвердження. На основі проведених досліджень автором розроблено новий ливарний жароміцний нікелевий сплав ЗМІ-М8, який атестовано на ДП «Івченко-Прогрес». Крім того, запропоновані методологічні підходи захищено патентами України на корисну модель.

Таким чином, проведений аналіз дає підстави вважати, що наукові результати дисертації є обґрунтованими, достовірними та такими, що мають достатній рівень наукової новизни. Вони отримані на основі комплексного поєднання теоретичних, розрахункових та експериментальних досліджень, підтверджені результатами практичної апробації та впровадження. Сукупність отриманих автором результатів є вагомим внеском у розвиток матеріалознавчих основ створення та оптимізації жароміцних нікелевих сплавів для відповідальних деталей газотурбінних двигунів.

#### **Оцінка змісту дисертації в цілому, її завершеності та дотримання принципів академічної доброчесності**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Глотки Олександра Анатолійовича повністю відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 Матеріалознавство. Дисертаційна робота є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому послідовно вирішено поставлені автором наукові та науково-технологічні завдання. Зміст дисертації відповідає заявленій темі, меті та завданням дослідження, а її структура є логічною і послідовною.

За результатами аналізу дисертації, автореферату, наукових публікацій здобувача та наведених у роботі посилань ознак порушення принципів академічної доброчесності не встановлено.

## **Мова та стиль викладених результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою. В тексті дисертації використано загальноприйняту наукову термінологію. Зміст дисертації є виваженим та цілісним в достатній мірі, робота відповідає темі дослідження.

Робота складається зі вступу, семи розділів, висновків та додатків. Роботу викладено на 281 сторінках, основного тексту 212 сторінок, список використаних 340 джерел на 41 сторінці та 14 додатків на 29 сторінках, що цілком відповідає докторській дисертації.

У **вступі** обгрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет, методи дослідження, наведено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, представлено загальну характеристику роботи, структуру та обсяг дисертації. Надано відомості про впровадження результатів роботи, апробацію, особистий внесок автора, а також публікації за темою дисертації.

У **першому** розділі проаналізовано сучасний стан проблеми та найпопулярніші на сьогоднішній день шляхи її вирішення у технічній та науковій літературі; описано основи механізмів впливу на структуру та властивості нікелевих сплавів; обгрунтовано доцільність вибору легувальних елементів та оптимальні рівні легування. Огляд літературних джерел виконано критично, з чітким виділенням нерозв'язаних питань, що логічно підводить до формулювання завдань власних досліджень.

**Другий** розділ містить детальний опис матеріалів і методів дослідження, що забезпечує відтворюваність експериментів і свідчить про високий рівень методичної культури автора.

У **третьому** розділі досліджено вплив легувальних елементів на теплофізичні, механічні та корозійні властивості ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Встановлено відповідні закономірності та запропоновано показники, що дають змогу прогнозувати комплекс експлуатаційних характеристик сплавів.

У **четвертому** розділі встановлено взаємозв'язок між хімічним складом і механічними властивостями жароміцних нікелевих сплавів. Розроблено залежності для прогнозування міцності, кількості зміцнювальної  $\gamma'$ -фази та довготривалої міцності, що створює наукову основу для оптимізації складу сплавів.

**П'ятий** розділ присвячено дослідженню структурно-фазового стану ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Особливу увагу приділено карбідним фазам  $MC$ ,  $M_{23}C_6$  та  $M_6C$ , встановлено закономірності їх формування, складу та морфології залежно від хімічного складу сплавів.

У **шостому** розділі на основі отриманих теоретичних та експериментальних результатів розроблено алгоритм конструювання й удосконалення хімічного складу ливарних жаро-



міцних нікелевих сплавів. Запропонований підхід орієнтований на забезпечення заданого комплексу теплофізичних, механічних та експлуатаційних характеристик.

У цьому розділі здійснено практичну реалізацію розробленого алгоритму при створенні нового жароміцного нікелевого сплаву ЗМІ-М8 для корпусних деталей газотурбінних установок. Проведено комплексну оцінку його структури, механічних та експлуатаційних властивостей і підтверджено відповідність заданим контрольованим характеристикам.

Висновки містять узагальнення основних наукових і практичних результатів дисертаційної роботи. Особливо важливим практичним результатом є розроблення та впровадження сплаву ЗМІ-М8, для якого заявлено підвищення довговічності корпусних деталей газотурбінних двигунів приблизно вдвічі порівняно

Загалом структура дисертації є логічною, внутрішньо узгодженою та забезпечує цілісне сприйняття отриманих результатів.

Реферат повністю узгоджується зі змістом дисертації та підготовлений відповідно до чинних нормативних вимог. Ознак плагіату не виявлено. Докторська дисертація не містить матеріалів, які раніше виносилися на захист кандидатської дисертації.

#### **Повнота відображення наукових положень, висновків і результатів дисертації в опублікованих роботах**

Основні наукові положення, висновки та результати дисертаційної роботи Глотки Олександра Анатолійовича знайшли достатньо повне та всебічне відображення в опублікованих наукових працях здобувача.

Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 74 наукових працях, серед яких 1 монографія та 41 наукова стаття, з них 19 статей опубліковано у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, з них 3 – у журналах кuartилію Q<sub>2</sub>, 13 – Q<sub>3</sub>, 3 – Q<sub>4</sub>. Такий обсяг і структура публікацій свідчать про систематичну та достатньо широку апробацію основних результатів дисертаційної роботи. Інші публікації представлені матеріалами та тезами доповідей на наукових конференціях, що забезпечило додаткове обговорення та апробацію отриманих результатів у науковому середовищі.

Аналіз опублікованих праць свідчить, що в них послідовно висвітлено основні напрями та результати дисертаційного дослідження. Зокрема, опубліковано результати щодо прогнозування властивостей жароміцних нікелевих сплавів, визначення температурних інтервалів їх кристалізації та гомогенізації, моделювання термодинамічних процесів і встановлення впливу легувальних елементів на критичні температури та структуроутворення багатокомпонентних нікелевих систем.

Окремий напрям публікацій становлять дослідження карбідних фаз та розподілу легувальних елементів у жароміцних нікелевих сплавах. У роботах здобувача представлено ре-

зультати прогнозування складу карбідів, дослідження їх морфології та закономірностей розподілу легувальних елементів за різних умов кристалізації.

Також у публікаціях відображено результати дослідження високотемпературної корозії, фазового складу, впливу системи легування на характеристики міцності та інших властивостей жароміцних нікелевих сплавів. Таким чином, тематика опублікованих робіт охоплює основні складові дисертації: теоретичне моделювання, прогнозування властивостей, теплофізичні характеристики, структуроутворення, фазовий склад, карбідні фази, механічні властивості та високотемпературну корозію.

Отже, кількість, тематична спрямованість та рівень опублікованих праць забезпечують достатньо повне відображення основних наукових положень, висновків і результатів дисертації та свідчать про належний рівень їх наукової апробації. Таким чином, вимоги МОН України щодо повноти відображення результатів дисертаційного дослідження в наукових публікаціях дотримані в повному обсязі.

#### **Практична значимість отриманих результатів**

Практична значимість результатів дисертаційної роботи Глотки Олександра Анатолійовича полягає у розробленні науково обґрунтованих підходів до конструювання та оптимізації хімічного складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів, призначених для виготовлення відповідальних деталей газотурбінних двигунів.

Важливим практичним результатом роботи є розроблений автором алгоритм прогнозування та оптимізації комплексу властивостей жароміцних нікелевих сплавів, який дає можливість визначати раціональний хімічний склад матеріалу з урахуванням його структурно-фазового стану, критичних температур, механічних, теплофізичних та корозійних характеристик. Застосування такого підходу дозволяє скоротити обсяг експериментальних досліджень при розробленні та удосконаленні нових складів сплавів.

Безпосереднє практичне значення мають результати дослідження закономірностей формування карбідних фаз та розподілу в них легувальних елементів. Отримані залежності можуть бути використані під час розроблення складів сплавів із заданими експлуатаційними характеристиками та підвищеною стабільністю структури за високотемпературного навантаження.

Вагомим підтвердженням практичної спрямованості дисертації є розроблення нового ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЗМІ-М8, який атестовано на ДП «Івченко-Прогрес», АТ «МОТОР СІЧ» та ДП «УкрНДІСпецСталь» для можливого використання при виготовленні корпусних деталей газотурбінних двигунів та газотурбінних установок. Таким чином, результати дисертації доведені до рівня практичної апробації та можуть бути використані у виробництві відповідальних деталей газотурбінної техніки.



Практичне значення роботи також полягає у можливості використання розроблених методичних підходів і математичних моделей на етапах проєктування нових матеріалів, вибору оптимального складу жароміцних сплавів, оцінювання їх експлуатаційних характеристик та вдосконалення технології виробництва відповідальних литих деталей.

Отримані результати мають потенціал для підвищення надійності та довговічності деталей газотурбінних двигунів, скорочення витрат на експериментальне відпрацювання нових складів сплавів та підвищення ефективності матеріалознавчого забезпечення газотурбобудування.

Отже, практична значимість дисертаційної роботи визначається тим, що отримані наукові результати не обмежуються теоретичними закономірностями, а доведені до розроблення конкретного матеріалу, алгоритму прогнозування та рекомендацій щодо оптимізації складу жароміцних нікелевих сплавів, що створює передумови для їх подальшого використання у виробництві та експлуатації газотурбінної техніки.

#### **Зауваження та дискусійні положення**

Високо оцінюючи науковий рівень дисертаційної роботи, її наукову новизну та практичну значущість, вважаю за необхідне висловити декілька зауважень і дискусійних положень, які можуть бути предметом наукової дискусії.

1. У роботі значна увага приділена встановленню закономірностей впливу хімічного складу жароміцних нікелевих сплавів на їх структурно-фазовий стан та експлуатаційні властивості. Водночас, на мою думку, доцільно було б ширше обговорити межі застосовності отриманих регресійних моделей та встановлених залежностей для сплавів інших систем легування. Це дозволило б чіткіше визначити універсальність запропонованого підходу та його можливості для прогнозування властивостей нових багатокomпонентних сплавів.

2. Автором обґрунтовано важливу роль карбідних фаз у формуванні властивостей жароміцних нікелевих сплавів. Разом із тим дискусійним залишається питання кількісного співвідношення впливу карбідних фаз та  $\gamma'$ -фази на комплекс механічних і експлуатаційних характеристик сплавів. Було б доцільно більш детально розмежувати внесок цих структурних складових у формування кінцевих властивостей матеріалу.

3. Доцільно було б дещо ширше представити у роботі питання зіставлення результатів термодинамічного моделювання методом CALPHAD з експериментальними даними, зокрема щодо можливих причин їх певної розбіжності.

4. У дисертації розглянуто вплив легувальних елементів на критичні температури фазових перетворень, структурно-фазовий стан та властивості жароміцних нікелевих сплавів. Водночас для практичного використання отриманих результатів у газотурбобудуванні цікавим було б більш детально висвітлити взаємозв'язок між прогнозованими матеріалознавчи-

ми характеристиками та реальними режимами експлуатації конкретних деталей газотурбінних двигунів, зокрема з урахуванням тривалості високотемпературного навантаження.

5. У роботі наведено результати розроблення та промислової апробації нового жароміцного нікелевого сплаву ЗМІ-М8. Водночас доцільно було б дещо ширше висвітлити його переваги порівняно з відомими промисловими аналогами за основними експлуатаційними характеристиками.

6. Окремим дискусійним положенням є оцінка економічної ефективності запропонованих матеріалознавчих і технологічних рішень. У роботі доцільно було б більш детально обґрунтувати методику розрахунку очікуваного економічного ефекту від використання розробленого складу. Зокрема, цікавим є врахування не лише прямої економії від зменшення витрат на легувальні компоненти або технологічні операції, а й економічного ефекту від підвищення довговічності деталей, збільшення міжремонтного ресурсу, зменшення кількості замін та простоїв газотурбінного обладнання. Такий комплексний розрахунок дозволив би повніше розкрити практичну цінність отриманих результатів.

7. Оформлення дисертації в цілому є якісним, проте потребує певного доопрацювання графічної частини: на рисунку 7.1 бажано передбачити індикаторні лінійки масштабу для всіх структур. Окремі поодинокі стилістичні та редакційні неточності в тексті мають здебільшого технічний характер і не впливають на загальне позитивне враження від дослідження.

Зазначені зауваження та дискусійні положення мають переважно рекомендаційний характер і не знижують загальної позитивної оцінки наукових і практичних результатів роботи. Вони стосуються переважно можливостей подальшого вдосконалення представлених результатів, розширення сфери застосування запропонованих моделей та поглиблення оцінки практичної та економічної ефективності отриманих результатів.

#### **Висновок про дисертаційну роботу в цілому та її відповідність чинним вимогам**

Дисертаційна робота Глотки Олександра Анатолійовича на тему «Науково-технологічні основи оптимізації процесів легування нікелевих сплавів для підвищення ресурсу газотурбінних двигунів» є завершеною самостійною науково-дослідною працею, у якій вирішено важливу науково-прикладну проблему матеріалознавства, пов'язану з розробленням науково обґрунтованих підходів до оптимізації складу, структурно-фазового стану та властивостей ливарних жароміцних нікелевих сплавів для відповідальних деталей газотурбінних двигунів. Робота характеризується високим теоретичним рівнем, методичною коректністю, практичною спрямованістю.

Наукові результати дисертації є обґрунтованими та достовірними, що забезпечується застосуванням сучасних експериментальних методів дослідження, математичного моделю-



вання, статистичної обробки результатів, використанням відповідного дослідницького обладнання, а також апробацією та практичним підтвердженням отриманих результатів.

Дисертаційна робота має логічну структуру, характеризується внутрішньою цілісністю, відповідає заявленій меті та поставленим завданням. Висновки дисертації сформульовані на основі отриманих результатів та відповідають змісту проведених досліджень.

Наукові результати, положення та висновки, що становлять зміст дисертації, належним чином відображені та відмежовані від результатів інших дослідників.

Дисертація Глотки О.А. повністю відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство. За актуальністю, науковою новизною та практичним значенням отриманих результатів, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, результатів і висновків дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 7, 8 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197 (зі змінами, внесеними згідно з постановами Кабінету Міністрів України №502 від 19.05.2023 р., №507 від 03.05.2024 р. та №928 від 30.07.2025 р.), а автор роботи Глотка Олександр Анатолійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство.

**Офіційний опонент,**

завідувачка кафедри інженерії матеріалів  
і цифрового виробництва ім. О.М. Петриченка Харківського національного автомобільно-дорожнього університету,  
Заслужений діяч науки і техніки України,  
д.т.н., проф.



Діана ГЛУШКОВА



вх. н 10. вг 19. 08. 2026 р