

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук,
старшого наукового співробітника **КВАСНИЦЬКОЇ Юлії Георгіївни**
на дисертаційну роботу **ГЛОТКИ Олександра Анатолійовича**
«Науково-технологічні основи оптимізації процесів легування нікелевих
сплавів для підвищення ресурсу газотурбінних двигунів»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних
наук зі спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

Актуальність роботи зумовлена потребою підвищення конкурентоспроможності вітчизняного машинобудування через впровадження сучасних наукових рішень у сфері газотурбобудування. Ключову роль у розвитку газотурбінної техніки відіграє створення нових жароміцних нікелевих сплавів із підвищеними експлуатаційними властивостями, здатних працювати за температур до 1100°C. Досягнення таких характеристик забезпечується складними системами легування з використанням багатокомпонентного хімічного складу та мінімізацією їх взаємодії. Водночас сучасні дослідження переважно зосереджені на визначення ролі зміцнюючої γ' -фазі, тоді як розподіл легувальних елементів в інших фазах, зокрема карбідних, вивчений недостатньо. Робота спрямована на розвиток наукових основ легування ливарних жароміцних сплавів і створення інноваційних хімічних складів для корпусних деталей газотурбінних установок.

Структура та об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Роботу викладено на 281 сторінці: основного тексту – 212 сторінки, список використаних джерел – 41 сторінка та 14 додатків на 29 сторінках. Структура дисертації цілком логічна, підпорядкована меті і в цілому відповідає вимогам МОН України за оформленням.

У вступі сформульована актуальність проблеми, визначено мету, основні завдання дослідження, наведені основні результати отримані автором, їхня практична значимість і новизна.

У першому розділі здійснено системний аналіз сучасного стану розвитку жароміцних нікелевих сплавів для газотурбінного двигунобудування. Узагальнено еволюцію підходів до легування, починаючи від емпіричних композицій до складних багатокомпонентних систем із контрольованою фазовою архітектурою. Критично проаналізовано існуючі концепції зміцнення, зокрема домінуючу роль γ' -фази, при цьому аргументовано доведено недостатність одновекторного підходу без урахування взаємодії всіх легувальних компонентів. Показано, що сучасні промислові композиції досягли границі традиційної оптимізації за рахунок простого підвищення вмісту окремих елементів.

Встановлено, що більшість досліджень концентрується на окремих аспектах (γ' -фаза, коефіцієнти ліквіації, жароміцність), тоді як комплексна модель прогнозування властивостей відсутня.

Таким чином, у розділі обґрунтовано наукову необхідність створення інтегрованого підходу до оптимізації складу жароміцних нікелевих сплавів, що враховує термодинамічну рівновагу, фазоутворення та експлуатаційні характеристики в єдиній системі координат. Саме ця концептуальна прогалина визначає логіку і новизну представленої роботи.

Другий розділ формує фундаментальну методичну основу дослідження. Автором обґрунтовано вибір широкої репрезентативної вибірки ливарних жароміцних нікелевих сплавів, що охоплює різні системи легування та технології кристалізації. Такий підхід забезпечує статистичну достовірність і універсальність встановлених закономірностей.

Застосовано поєднання сучасного термодинамічного моделювання (CALPHAD) із комплексом експериментальних методів — від спектрального аналізу до електронної мікроскопії та рентгеноструктурних досліджень.

Використано стандартизовані методики визначення механічних і корозійних характеристик, що гарантує відтворюваність результатів.

Методологія роботи демонструє високий рівень наукової культури дослідження та забезпечує обґрунтованість отриманих висновків.

У третьому розділі розроблено теоретично обґрунтовану систему критеріїв (співвідношення K_γ та $K_{\gamma'}$), які відображають конкуренцію і кооперацію γ' -утворюючих та γ -твердорозчинних зміцнюючих елементів. Запропоновані аналітичні вирази базуються на термодинамічному підході до мінімізації вільної енергії системи та враховують концентраційні фактори багатокomпонентних сплавів.

Вперше для широкого діапазону складів побудовано узагальнені залежності критичних температур (ліквідусу, солідусу, евтектики, гомогенізації) від інтегральних співвідношень легування. Показано наявність екстремальних значень температурного інтервалу кристалізації, що має безпосереднє технологічне значення.

Встановлено специфіку впливу складу на теплофізичні параметри при рівновісній та спрямованій кристалізації. Розрахункові результати підтверджені експериментально з похибкою не більше 20%, що свідчить про високу прогностичну здатність моделей.

Отримані залежності мають принципове значення для оптимізації режимів виплавки, гомогенізації та термічної обробки, а також дозволяють мінімізувати кількість натурних експериментів.

У четвертому розділі встановлено системний зв'язок між інтегральними характеристиками легування та механічними властивостями. Показано, що співвідношення $K_{\gamma'}$ виступає узагальненим параметром, який адекватно відображає частку γ' -фази та рівень жароміцності.

Отримано лінійні кореляційні залежності між складом і довготривалою міцністю, що мають високі коефіцієнти детермінації. Доведено, що збільшення частки γ' -утворювальних елементів забезпечує підвищення об'ємної частки зміцнювальної фази і, відповідно, експлуатаційної надійності.

Похибка прогнозування не перевищує 15%, що підтверджує практичну придатність запропонованого підходу. Розділ демонструє перехід від емпіричного підбору складу до математично обґрунтованого конструювання властивостей.

У н'ятому розділі розроблено критерій $K_{\text{пс}}$ для інтегральної оцінки впливу легувальних елементів на корозійну стійкість. Встановлено, що мінімум швидкості високотемпературної корозії відповідає певному балансу елементів, які формують щільну захисну оксидну плівку. Показано експоненціальний характер залежності швидкості корозії від співвідношення легування. Вперше запропоновано аналітичний підхід до прогнозування питомої втрати маси на стадії розробки складу. Отримані результати дозволяють цілеспрямовано формувати композиції з підвищеним ресурсом експлуатації в агресивних середовищах газотурбінних установок.

Шостий розділ суттєво розширює уявлення про роль карбідних фаз у формуванні властивостей ЖНС. Запропоновано критерії $K_{\text{МС}}$ та $K_{\text{М23С6}}$, які дозволяють прогнозувати температури карбідних ліквідусів і стабільність фаз. Доведено, що морфологія карбідів може бути керованою через оптимізацію складу, а не лише через зміну умов кристалізації. Показано вплив титану, танталу, ніобію, хрому та гафнію на трансформацію складу й форми карбідів. Встановлено механізми запобігання утворенню шрифтових карбідів і топологічно щільноупакованих фаз, що є критично важливим для підвищення тріщиностійкості. Розділ формує новий підхід до управління карбідною підсистемою як невід'ємною складовою конструкційної надійності.

У сьомому розділі узагальнено результати дослідження у вигляді практичного алгоритму конструювання ливарних жароміцних нікелевих сплавів. На його основі розроблено новий сплав ЗМІ-М8, що пройшов лабораторну та промислову апробацію.

Підтверджено відповідність розрахункових і фактичних характеристик, що свідчить про високу адекватність теоретичних моделей. Показано конкурентні переваги нового матеріалу для корпусних деталей газотурбінних

двигунів з прогнозованим значним економічним ефектом від впровадження. Отримані результати доводять завершеність наукового циклу – від формування теоретичної концепції до промислової реалізації та практичного впровадження.

Зміст реферату відповідає основним положенням дисертації, а його оформлення, в цілому, відповідає вимогам, які висуваються до докторської дисертації.

Оцінка обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій. Обґрунтованість та достовірність основних наукових положень дисертаційної роботи підтверджено правильним вибором сучасного дослідного обладнання та проведенням коректних експериментальних досліджень.

У роботі розв'язано науково-прикладну проблему розвитку та впровадження теоретичних і методичних основ оптимізації процесів легування й визначення теплофізичних параметрів для формування сприятливої структури ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Отримані результати базуються на розвитку теорії міжатомної взаємодії з урахуванням впливу легування на механічні властивості, корозійну стійкість, хімічний склад карбідів і температури фазових перетворень. Практичне значення полягає у підвищенні жароміцності та довговічності корпусних деталей газотурбінних двигунів із одночасним скороченням обсягу фізичних експериментів. Достовірність роботи підтверджується відповідністю наукових положень, висновків і рекомендацій встановленим вимогам МОН України щодо оформлення та змісту дисертаційних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів. Розроблені закономірності впливу легувальних елементів на властивості ливарних жароміцних нікелевих сплавів з урахуванням їх конкуренції та кооперації, що відображено у запропонованих співвідношеннях $K_{\gamma'}$, K_{γ} та $K_{\text{пс}}$. Встановлено, що ці співвідношення забезпечують високоточне прогнозування властивостей сплавів ($R^2 \geq 0,8$) у широких інтервалах вмісту легувальних елементів. Уперше

побудовано діаграми для визначення теплофізичних характеристик сплавів різних технологій литва, що дозволяють прогнозувати критичні температури та обґрунтовано підбирати хімічний склад. Розширено теоретичні уявлення про вплив складу на високотемпературну корозію та встановлено оптимальні параметри ($K_{pc} \approx 2$), за яких формується захисна плівка з мінімальною швидкістю окиснення. Запропоновано новий підхід до прогнозування температур карбідних ліквідусів через співвідношення K_{MC} і $K_{M_{23}C_6}$, що забезпечує керування фазовими перетвореннями та стабільністю структури. Набули подальшого розвитку уявлення про структурні перетворення і морфологію карбідів MC та $M_{23}C_6$, що дозволило оптимізувати легування та підвищити тріщиностійкість і довговічність сплавів для корпусних деталей газотурбінних двигунів.

Наукова цінність викладених у дисертації Олександра ГЛОТКИ результатів підтверджується комплексним підходом до проведення досліджень та їх узгодженням з положеннями сучасного матеріалознавства.

Практичне значення отриманих результатів. Значну частину роботи автор присвятив розробці алгоритму прогнозування властивостей жароміцних нікелевих сплавів, що дозволило значно зменшити обсяг експериментальної частини. За результатами встановлених закономірностей теоретичних та експериментальних досліджень, розроблений новий хімічний склад ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЗМІ-М8, який використовується для корпусних деталей газотурбінних установок. Очікуваний економічний ефект від розробки нового ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЗМІ-М8 та впровадження його у виробництво склав 15 368 300 грн. на рік.

Зв'язок дисертаційного дослідження з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження є складовою частиною науково-дослідних робіт:

1. «Розробка та дослідження економнолегованих жаростійких листових сталей з підвищеними корозійно- та зносостійкістю», ДБ 2812, 2012-2014 рр., № держ. реєстрації 0112U002022.

2. «Розробка ефективних технологій застосування полімерабразивних інструментів (ПАІ) при обробці тонкостінних деталей із сталей та сплавів на основі нікелю, титану та алюмінію», ДБ 2815, 2015-2016 рр., № держ. реєстрації 0115U002568.

3. «Комплексне дослідження технологічних і службових характеристик модернізованого складу сплаву ЖСЗЛС-М», ГД №2813, 2014-2017 рр., № держ. реєстр. 0113U007691.

4. "Створення новітніх конструкційних сплавів та композитів авіаційної і космічної техніки", НДР № 3/22, 2022-2024рр., № держ. реєстр. 0122U001316, в яких Олександр ГЛОТКА брав участь в якості виконавця та керівника.

Публікації за темою дисертації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 74 наукових праць, з них 1 монографія, 41 статей у наукових фахових виданнях України та періодичних виданнях інших держав (в тому числі 19 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus і Web of Science, з них 3 у журналах кuartиллю Q2, 13 – Q3 та 3 – Q4), 30 у матеріалах і тезах доповідей міжнародних і вітчизняних науково-технічних конференцій, 2 патенти України на корисну модель. Отримані дисертантом наукові результати, представлені в дисертаційній роботі, повністю висвітлені в опублікованих працях та апробовані на конференціях.

Зауваження та рекомендації до дисертації. Дисертаційна робота Глотки Олександра Анатолійовича заслуговує позитивної оцінки. Разом з тим вона містить низку недоліків:

1. В першому розділі слід було б більше уваги приділити технологіям виплавлення жароміцних нікелевих сплавів рівновісної та спрямованої кристалізації та показати, як вони впливають на структуру.
2. Якою мірою запропоновані автором співвідношення K_{γ} , $K_{\gamma'}$ та $K_{\text{пс}}$ можна вважати універсальними для різних систем легування нікелевих жароміцних сплавів, і які існують обмеження їх застосування?

3. Чи можна вважати зміну морфології карбідів за рахунок хімічного складу рівнозначним або більш ефективним фактором порівняно зі зміною умов кристалізації?
4. В розділі 7 вказуються вимоги по механічним властивостям, які висуваються до сплаву, однак не вказано, в якому середовищі працює виріб.
5. Чи можна вважати розроблений сплав ЗМІ-М8 конкурентоспроможним відносно сучасних світових аналогів, зокрема за показниками жароміцності та корозійної стійкості?
6. Зауваження щодо оформлення та викладення матеріалу:
 - в роботі поодинокі зустрічаються термінологія «легуючі», все таки краще притримуватися термінології «легувальні»;
 - зустрічаються деякі стилістичні та редакційні неточності;
 - можливо в рефераті треба було привести більше мікроструктур сплавів.

Водночас, зроблені зауваження не є запереченням завершеності роботи і не зменшують її теоретичної та практичної цінності, а також не викликають сумніву у достовірності її наукових положень, висновків і практичних рекомендацій.

Загальний висновок. У роботі присутні усі елементи пошуку – від теоретичних та лабораторних досліджень до практичних випробувань, що спільно може бути охарактеризовано як успішне розв'язання важливої науково-практичної задачі, пов'язаної з підвищенням коефіцієнта корисної дії газотурбінних двигунів.

Дисертаційна робота Глотки О.А. «Науково-технологічні основи оптимізації процесів легування нікелевих сплавів для підвищення ресурсу газотурбінних двигунів» подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство, є завершеною кваліфікаційною науковою працею з новими науковими та практичними результатами, що раніше не захищалися. Дисертація написана сучасною

науково-технічною мовою, послідовно, логічно та грамотно. Стиль викладення матеріалу забезпечує доступність його сприйняття.

Дисертація Глотки О.А. повністю відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство. Реферат дисертації повністю відображає її основні наукові та практичні положення. За актуальністю, науковою новизною та практичним значенням отриманих результатів, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, результатів і висновків дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 7 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.), не має ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації, а її автор Глотка Олександр Анатолійович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент

доктор технічних наук,

старший науковий співробітник,

Фізико-технологічного інституту металів

та сплавів НАН України,

член кореспондент НАН України

Юлія КВАСНИЦЬКА

Підпис КВАСНИЦЬКОЇ Ю.Г. засвідчую:

Т.в.о. директора Фізико-технологічного

інституту металів та сплавів НАН України,

доктор технічних наук, доцент



Інна ШАЛЕВСЬКА

Вх. № 8 від 17.08.2026