

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора
ДУРЯГІНОЇ Зої Антонівни на дисертаційну роботу
ГЛОТКИ Олександра Анатолійовича на тему:
**«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.

1. Актуальність теми дисертації.

Сучасні тенденції в енергетичному машинобудуванні підтверджують критичну необхідність трансферу авіакосмічних технологій у сектор наземних газотурбінних установок. Підвищення робочих температур перед турбіною до 1400–1600°C робить застосування інноваційних матеріалів не просто перевагою, а базовою умовою досягнення конкурентного коефіцієнта корисної дії.

Досвід світових лідерів, таких як General Electric (використання сплавів серії Rene), Rolls-Royce та Pratt & Whitney (широке впровадження Alloy 718 та інших суперсплавів на основі нікелю), наочно демонструє: майбутнє галузі — за жароміцними та корозійностійкими матеріалами. Впровадження таких рішень дозволяє суттєво підвищити ресурс газотурбінних двигунів та загальну надійність установок у критичних режимах експлуатації.

Окрім вдосконалення проточного тракту, стратегічним завданням сучасного двигунобудування є збільшення температури експлуатації корпусних деталей (статорних частин, корпусів камер згоряння та опор). Це зумовлено декількома ключовими факторами:

1. *Термодинамічна ефективність:* Підвищення температури газу на вході в турбіну до 1400–1600°C неминуче призводить до інтенсивного теплового випромінювання та конвективного нагріву корпусів, що потребує матеріалів з вищою термостабільністю для збереження геометрії та радіальних зазорів.

2. *Масогабаритна оптимізація:* Збільшення температурних лімітів дозволяє мінімізувати обсяги холодного повітря, що відбирається від компресора

для охолодження корпусних деталей. Це безпосередньо підвищує корисну потужність двигуна та покращує його питому масу.

3. *Експлуатаційна надійність*: Використання передових жароміцних сплавів для корпусів високого тиску критично важливе для запобігання термічній втомі та повзучості матеріалу при тривалих навантаженнях.

Таким чином, перехід від теорії легування до промислової реалізації нових високоефективних матеріалів є актуальною науково-технічною задачею, розв'язання якої сприятиме створенню матеріалів нового покоління з поліпшеними властивостями, розширенню сфер їхнього застосування та задоволення сучасних потреб промисловості. У зв'язку з цим, дисертація здобувача Глотки О.А. є своєчасною та актуальною.

2. Загальна характеристика дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота включає загальну характеристику роботи, 7 розділів, загальні висновки, список використаних джерел із 340 найменувань та додатки. Роботу викладено на 281 сторінках, основного тексту 212 сторінок, список використаних джерел на 41 сторінці та 14 додатків на 29 сторінках. Структура дисертації цілком логічна, підпорядкована меті і в цілому відповідає вимогам МОН України за оформленням.

У *вступній частині* дисертаційної роботи аргументовано розкрито актуальність обраної тематики, чітко окреслено мету та завдання дослідження, визначено його об'єкт і предмет, а також охарактеризовано застосовані методи наукового пошуку. Висвітлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Подано загальну характеристику роботи, її структуру й обсяг. Окремо наведено інформацію щодо впровадження результатів дослідження, їх апробації, особистого внеску автора та переліку публікацій, підготовлених за темою дисертації.

У *першому розділі* автором проведено глибокий аналіз сучасного стану вирішення досліджуваної проблеми на основі критичного огляду наукової та

технічної літератури. Важливою перевагою розділу є детальний розгляд фундаментальних механізмів впливу на структуроутворення та експлуатаційні характеристики нікелевих сплавів. Автор переконливо обґрунтовує вибір системи легування та їхні концентраційні межі, що стало логічним підґрунтям для коректного формулювання мети та завдань дисертаційного дослідження.

Другий розділ присвячено методологічному апарату роботи. Вибір об'єктів дослідження та комплекс експериментальних методів є науково обґрунтованим і відповідає поставленій меті. Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням сучасного аналітичного обладнання та поєднанням взаємодоповнюючих методів дослідження, зокрема: методів оптичної мікроскопії, рентгеноструктурного, рентгеноспектрального, та фрактографічного аналізу.

У третьому розділі наведено результати комплексного дослідження впливу легувальних елементів на теплофізичні характеристики жароміцних нікелевих сплавів. Автором проведена значна робота з аналізу та статистичної обробки експериментальних даних, що дозволило виявити закономірності зміни властивостей сплавів залежно від їх складу.

Окремої уваги заслуговує науковий підхід до врахування ефектів конкуренції та кооперації різних груп елементів. На основі цього автором:

- розроблено математичні співвідношення, що встановлюють кореляційний зв'язок між хімічним складом та теплофізичними параметрами ливарних сплавів;
- запропоновано аналітичні залежності, які мають високу прогностичну здатність щодо визначення критичних температур виплавлення та режимів термічного оброблення.

Практична значущість розділу полягає у можливості суттєвого скорочення обсягів дороговартісних експериментальних робіт. Отримані результати дозволяють оптимізувати технологічні параметри виробництва нікелевих

сплавів розрахунковим шляхом, що підкреслює прикладну цінність представленої роботи.

У четвертому розділі автором встановлено фундаментальні зв'язки між хімічним складом та механічними характеристиками матеріалів, що створює передумови для суттєвої оптимізації витрат при розробці нових ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Запропонований методичний підхід дозволяє замінити значну кількість вартісних експериментів точними попередніми розрахунками на основі виявлених аналітичних залежностей. Зокрема, дисертантом доведено високу ефективність застосування параметра $K\gamma'$, як базового критерію для обчислення показників довготривалої міцності, що безпосередньо пов'язано з фізичними процесами збільшення концентрації зміцнювальної γ' -фази. Адекватність розроблених моделей підтверджено на прикладі промислових сплавів RR2000 та ЖС-32ВІ, де збіжність розрахункових та експериментальних даних із похибкою не більше 10% свідчить про можливість їх широкого практичного впровадження.

Важливе наукове значення має також розроблена автором методика оцінки корозійної тривкості сплавів. Замість традиційного аналізу впливу окремих елементів, у роботі запропоновано та обґрунтовано комплексний показник K_{nc} . Це дозволило встановити експоненціальну залежність швидкості корозії від складу сплаву, враховуючи як позитивний вплив хрому, титану та алюмінію, так і деструктивну дію вольфраму, молібдену та вуглецю. Отримані графічні моделі забезпечують можливість прогнозування поведінки матеріалу в агресивних середовищах при різних температурах ще на стадії проектування, що гарантує науково обґрунтований вибір хімічного складу для деталей, які працюють у надскладних умовах.

У п'ятому розділі автором встановлено фундаментальні закономірності впливу хімічного складу на тип, стабільність та морфологію карбідних фаз у жароміцних нікелевих сплавах. Дисертантом науково обґрунтовано роль танталу, ніобію та гафнію у формуванні термічно стійких карбідів сприятливої округлої форми, що забезпечує оптимальне поєднання міцності та пластичності матеріалу.

Окрему увагу приділено визначенню граничних концентрацій хрому та вольфраму, перевищення яких призводить до небажаного виділення ТЩУ-фаз і окрихчування сплаву. Важливим результатом є розробка аналітичних залежностей для прогнозування температур ліквідусу та об'ємної частки карбідів залежно від рівня легування. Отримані дані дозволяють здійснювати цілеспрямоване керування фазовим складом, мінімізуючи схильність до тріщиноутворення та підвищуючи експлуатаційну надійність виробів.

У шостому розділі автором проведено успішну апробацію встановлених раніше закономірностей на прикладі широкої номенклатури промислових сплавів. Дисертантом доведено високу ефективність комплексного підходу до легування, що базується на синергії розрахункових методів та експериментальних даних. Головним науково-прикладним здобутком розділу є розробка універсального алгоритму для проектування нових матеріалів та модернізації існуючих промислових марок. Запропонований концептуальний підхід дозволяє цілеспрямовано формувати необхідний рівень властивостей сплавів шляхом прецизійної оптимізації їхнього хімічного складу. Реалізація цього алгоритму забезпечує науково обґрунтований перехід від емпіричного підбору складів до їхнього теоретичного прогнозування.

У сьомому розділі представлено практичну реалізацію розробленого алгоритму при створенні нового жароміцного сплаву для корпусних деталей газотурбінних установок. Використання авторської методики дозволило провести попередній розрахунок контрольованих характеристик для низки дослідних складів та обрати оптимальний варіант за заданими критеріями. Результатом проведеної роботи став новий сплав марки ЗМІ-М8, який пройшов успішну апробацію на провідних підприємствах регіону. Порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних показників підтвердив високу точність та надійність запропонованого методу проектування. Практичне впровадження результатів дослідження засвідчує їхню важливість для сучасної промисловості та обґрунтованість висновків дисертації.

У висновках сформульовані найвагоміші результати проведених дисертантом досліджень, які підкреслюють наукову цінність роботи.

У додатках представлено документи, що підтверджують практичну цінність роботи (патенти та акти про використання результатів досліджень), а також список праць, опублікованих за темою дисертації.

Дисертація є завершеною науковою працею.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, наведених у дисертації, забезпечується проведенням автором аналізом наукових праць вітчизняних і зарубіжних учених; коректною постановкою завдань досліджень; результатами проведених експериментальних досліджень з використанням сучасних методів досліджень та інструментарію для їх реалізації; відтворюваністю результатів і точністю вимірювань. Це підтверджується результатами наукових праць, опублікованих у наукових фахових виданнях України та періодичних міжнародних виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus і Web of Science та апробаціях одержаних результатів на вітчизняних і міжнародних науково-технічних конференціях. Достовірність роботи підтверджується відповідністю наукових положень, висновків і рекомендацій встановленим вимогам МОН України щодо оформлення та змісту дисертаційних досліджень.

4. Наукова новизна одержаних результатів.

У роботі отримано нові наукові результати та твердження. Вважаю, що такими новими результатами, отриманими Глоткою О.А., є:

- Шляхом комплексного термодинамічного та експериментального аналізу було поглиблено розуміння взаємодії груп легувальних елементів у жароміцних

нікелевих сплавах, що дозволило розробити розрахункові показники $K\gamma'$, $K\gamma$ та K_{nc} для прогнозування властивостей і корозійної стійкості матеріалу.

- Вперше розроблені діаграми на основі параметрів $K\gamma'$ та $K\gamma$, які дозволяють розрахунково встановити теплофізичні характеристики нікелевих жароміцних сплавів залежно від специфіки їхнього хімічного складу, сформованої різними методами лиття.

- Встановлено, що комплексні параметри легування ($K\gamma'$ і $K\gamma$) є визначальними для формування мікроструктури ливарних жароміцних нікелевих сплавів, контролюючи об'ємну частку γ' -фази, співвідношення розміру кристалічних ґраток, а також ключові показники короткотривалої та довготривалої міцності. Це дозволило отримати раціональний комплекс показників якості корпусних деталей із жароміцних нікелевих сплавів.

- Доведено, що оптимізація хімічного складу через показник $K_{nc} \approx 2$ мінімізує швидкість високотемпературної корозії шляхом формування на поверхні термостабільного захисного оксидного бар'єру з низькою проникністю для окисників та агресивних сполук.

- Розроблено методику термодинамічного керування фазовим складом через параметри K_{MC} та $K_{M_{23}C_6}$, що дозволяє шляхом регулювання температур ліквідусу карбідів типів MC та $M_{23}C_6$ оптимізувати мікроструктурну стабільність і запобігти деградації матеріалу в робочих режимах.

- Доведено можливість керування топологією карбідних фаз шляхом оптимізації легування, що дозволяє трансформувати небажану шрифтову морфологію карбідів типу MC у сприятливіші форми для суттєвого підвищення тріщиностійкості та експлуатаційної надійності сплавів.

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

5. Практичне значення роботи.

1. Для встановлення критичних температур жароміцних нікелевих сплавів були розроблені діаграми на основі отриманих співвідношень $K\gamma$ та $K\gamma'$, що дозволило проводити оптимізацію процесів виплавлення та термічного оброблення виробів.

2. Розроблено співвідношення K_{nc} , яке дозволяє визначити середню швидкість корозії ливарних жароміцних нікелевих сплавів та показано оптимальні значення цього параметра, за яких сплави набувають мінімальні значення швидкості корозії.

3. Отримано залежності, які дозволяють оптимізувати режими термічного оброблення жароміцних нікелевих сплавів. Особливо актуально це для карбідів типу $M_{23}C_6$ та M_6C , що виділяються під час термічного оброблення.

4. Створений алгоритм конструювання та уточнення хімічного складу ливарних жароміцних сплавів дозволяє значно знизити практичну складову та підвищити продуктивність технологам, що в умовах дефіциту матеріальних ресурсів дає змогу отримати необхідний рівень властивостей сплаву.

Вагоме практичне значення матеріалів дисертації підтверджується актами впровадження на виробництві та розрахунком економії коштів на закупівлю імпортних матеріалів, що становить 15 368 300 грн /рік.

6. Впровадження результатів.

Результати досліджень апробовані у компаніях АТ «МОТОР СІЧ», ДП «УкрНДІСпецСталь» та АТ «Івченко-Прогрес», а результати представлені у вигляді відповідних актів. Також результати роботи використовуються у освітньому процесі Національного університету «Запорізька політехніка» при підготовці бакалаврів та магістрів спеціальності G8 «Матеріалознавство», у дисциплінах «Тонкі методи дослідження», «Функціональне призначення матеріалів газотурбінних установок в енергетиці», «Спеціальні сталі та сплави в газотурбобудуванні», «Високотемпературна корозія матеріалів газотурбінних установок» та «Методи структурного аналізу».

7. Повнота викладу основних результатів роботи в наукових фахових виданнях.

Отримані дисертантом наукові результати, представлені в дисертаційній роботі, повністю висвітлені в опублікованих працях у високореєтингових журналах та апробовані на міжнародних і вітчизняних науково-технічних конференціях.

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 квартилю Q2, 13 – Q3 та 3 – Q4), 30 у матеріалах і тезах доповідей міжнародних і вітчизняних науково-технічних конференцій, 2 патенти України на корисну модель. Індекс Гірша автора становить 9.

8. Зауваження та коментарі до дисертації:

1. Після якої термічної обробки розглядаються мікроструктури сплаву ЗМІ-ЗУ приведені на рисунку 6.2, оскільки на структуру та хімічний склад карбідів впливають режими термічного оброблення?

2. Чому автором нехтуються домішкові елементи, вони можуть значно впливати на властивості жароміцних нікелевих сплавів?

3. Розроблений алгоритм дає змогу значно спростити оптимізацію та проектування нових хімічних складів жароміцних нікелевих сплавів, але така велика кількість розрахунків не дає змогу доволі швидко це зробити, чи не замислювався автор над спрощенням розрахунків?

4. Оскільки розроблений жароміцний нікелевий сплав ЗМІ-М8 має задовільні характеристики зварюваності, чи не була спроба використати його для 3D друку?

5. В роботі не проводиться визначення такого параметру як твердість, чому автором була знехтувана ця характеристика?

6. В авторефераті немає жодної дифрактограми, присутність яких значно спростила би сприйняття викладеного матеріалу.

7. При оформленні автореферату мають місце деякі дрібні помилки, наприклад: у списку використаних джерел відсутній пробіл між ініціалами авторів; рисунок 11 в, г немає підпису осі; присутні деякі стилістичні помилки.

Вищевказані зауваження не зменшують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи з точки зору наукового та практичного значення.

Загальний висновок.

Вважаю, що дисертаційна робота Глотки Олександра Анатолійовича «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. В роботі вирішено важливу науково-технічну проблему оптимізації процесів легування та визначення теплофізичних параметрів для формування сприятливої структури і підвищення експлуатаційної надійності та довговічності ливарних жароміцних нікелевих сплавів.

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, професор,
професор кафедри матеріалознавства
та інженерії матеріалів
Національного університету
«Львівська політехніка»,
заслужений діяч науки і техніки України

Зоя ДУРЯГІНА

Підпис професора Зої Дурягіної засвідчую:

Вчений секретар університету



Роман БРИЛИНСЬКИЙ

вх. № 5 в.г. 13.08.2020