

## **ВІДГУК**

офіційного опонента про дисертаційну роботу

**ТРУША Василя Степановича**

**“Наукові основи підвищення роботоздатності металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх сплавів дифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C)”**,

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

### **Актуальність теми дисертації.**

Метали IV групи періодичної системи хімічних елементів (титан, цирконій, гафній) та сплаву на їх основі є затребувані для виготовлення різних тонкостінних виробів як для авіації, так і для енергетики. Такі вироби під час експлуатації зазнають значних циклічних та статичних навантажень. Загальновідомо, що довговічність залежить від характеристик поверхневого шару. Тому пошук шляхів покращення властивостей поверхневого шару слугує актуальним предметом для досліджень матеріалознавців, що працюють з вищезгаданими металами.

Існуючі методи оброблення поверхневого шару мають низку обмежень щодо їх застосування до тонкостінних (менше 3 мм) виробів, особливо коли йде мова про вироби складної просторової конфігурації. Крім того, думки науковців щодо впливу поверхневого шару, модифікованого елементами втілення, розходяться: одні стверджують про позитивний вплив, а інші навпаки – про негативний. Такий двоякий вплив можна пояснити тим, що не регламентовані характеристики модифікованого поверхневого шару, а саме мікротвердість та глибина модифікованого шару. Встановлення кореляційних залежностей характеристик поверхневого шару та довговічністю для кожного з вище згаданих металів дозволить не лише продовжити роботоздатність, але й розширити спектр їх застосування. Дисертаційне дослідження, спрямоване якраз на встановленні таких залежностей і має велике практичне значення. Виходячи з вищесказаного, тема дисертації є актуальною як з наукової, так і з практичної точок зору, оскільки вона вирішує важливу проблему підвищення довговічності тонкостінних виробів з титанових, цирконієвих та гафнієвих тонкостінних виробів за циклічного та статичного навантажень.

### **Оцінка змісту та завершеності дисертації.**

Загальна структура дисертації є логічно структурованою, оптимальною за кількості розділів, легко читається та сприймається.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, визначено мету та завдання дисертаційного дослідження, сформульовано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, предмет, об'єкт та методи досліджень, розкрито зв'язок роботи з науковими програмами за темою роботи. Представлено перелік публікацій за темою дисертаційної роботи, а також зазначено її структуру та обсяг.

У **першому розділі** проведено літературний огляд за темою досліджень, Відзначено, що переважна кількість робіт присвячена дослідженню



властивостей титанових, цирконієвих та гафнієвих сплавів за об'ємного легування елементами виділення, а публікацій щодо впливу поверхневого насичення елементами втілення на фізико-механічні властивості є обмаль і результати досліджень, як вітчизняних, так і закордонних авторів є суперечливими. На основі проведеного аналізу літературного огляду сформульовано основні завдання для досліджень.

У **другому розділі** представлено методичну частину дисертації, зокрема інформацію про досліджувані матеріали, схеми насичення, обладнання для випробувань та досліджень.

У **третьому розділі** показано закономірності насичення титанових, цирконієвих, гафнієвих сплавів киснем, азотом та вуглецем за широкого діапазону температур та тривалості, а також результати аналітичних обчислень кінетики високотемпературної взаємодії титану, цирконію та гафнію з киснем, азотом, вуглецем.

У **четвертому розділі** представлено результати дослідження впливу температури, тривалості насичення у кисне-, азото-, вуглецевмісних газових середовищах на мікротвердість, глибину модифікованого шару, структуру, топографію металів Ti, Zr, Hf та сплавів на їх основі, а також та наведено аналітично розраховані ефективні коефіцієнти дифузії елементів втілення в металах IV групи.

У **п'ятому розділі** наведено: результати тестування титанових, цирконієвих, гафнієвих сплавів з модифікованими поверхневими шарами за різних умов випробувань (малоциклової втоми, тривалого статичного та ударного навантаження), фрактографічні особливості руйнування та еволюцію дислокаційної структури модифікованого шару технічного титану VT1-0 залежно від відносного приросту мікротвердості; обґрунтування режимів оброблення титанових та цирконієвих сплавів киснем для забезпечення властивостей, що відповідають регламентним вимогам; апробації методу акустичної емісії для контролю стану модифікованого поверхневого шару на трубках зі сплаву Zr-1Nb.

У **шостому розділі** досліджено закономірності взаємодії поверхневих шарів титанових, цирконієвих, гафнієвих сплавів, модифікованих киснем чи азотом та оцінено ефективність їх захисту, а також запропоновано концепцію підвищення роботоздатності виробів з Ti, Zr, Hf та сплавів на їх основі за статичних та циклічних навантажень.

У **висновках** грамотно, лаконічно та на високому науковому рівні сформульовано основні результати проведених досліджень.

У додатках наведено, зокрема акти про впровадження результатів дисертаційних досліджень.

Дисертаційна робота Труша В.С. є завершеною науковою працею.



### **Наукова новизна дисертаційних досліджень.**

На базі обробки масиву експериментальних та аналітичних досліджень згідно з поставленою метою дослідження у дисертації отримані такі основні нові наукові результати:

1) *Вперше* встановлено закономірності впливу параметрів (температура, тривалість, парціальний тиск) дифузійного насичення азотом, киснем та вуглецем поверхневих шарів титану, цирконію та гафнію на відносний приріст мікротвердості поверхні ( $\Delta HV^{\text{пов.}}$ ) та глибину модифікованого шару ( $l$ ), на їх роботоздатність за циклічних та статичних навантажень. Використовуючи експериментальні дані, побудовано номограми, які дають можливість оптимізувати параметри хіміко-термічного оброблення цих матеріалів для забезпечення високої роботоздатності.

2) *Вперше* розкрито фізичну природу ефекту підвищення роботоздатності титанових сплавів після насичення їх поверхневих шарів азотом та вуглецем, яка полягає у формуванні дислокаційної структури впорядкованого типу. На титані VT1-0 показано, що модифікування поверхневого шару азотом на  $\Delta HV^{\text{пов.}} = 80\%$  та вуглецем на  $\Delta HV^{\text{пов.}} = 90\%$  сприяло формуванню впорядкованої дислокаційної структури у вигляді або плоских скупчень, або петель відповідно.

3) *Вперше* виявлено зменшення (до 65%) схильності до поглинання водню тонколистового цирконієвого сплаву Zr-1Nb після модифікування його поверхневого шару киснем та азотом під час дифузійного насичення з газових середовищ.

4) *Вперше* встановлено характеристики поверхневого модифікованого шару ( $\Delta HV^{\text{пов.}}$ ,  $l$ ) цирконієвого сплаву Zr-1Nb, сформованого дифузійним насиченням киснем ( $\Delta HV^{\text{пов.}} = 60\%$ ,  $l = 30$  мкм), азотом ( $\Delta HV^{\text{пов.}} = 80\%$ ,  $l = 35$  мкм), щоб забезпечити підвищення роботоздатності за циклічного та статичного навантажень: за чистого згину – на  $\sim 23\%$ ; за циклічного розтягу – на  $\sim 25\%$  і за тривалого статичного навантаження на повітрі на базі 100 год за кімнатної температури – на  $\sim 12\%$ , а за  $380^\circ\text{C}$  – на  $\sim 6\%$ . За насичення воднем позитивний ефект модифікації поверхневого шару на довговічність виробів дещо нівелювався, але все ще зберігався.

### **Важливість отриманих результатів для науки і практики, можливі шляхи використання результатів дослідження.**

Серед отриманих практичних результатів слід зазначити такі:

- ✓ Розроблено концепцію підвищення роботоздатності металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх сплавів з модифікованими шарами, сформованими дифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C). Вона базується на формуванні у поверхневих шарах твердого розчину втілення на основі кисню, азоту або вуглецю з заданим підносним приростом мікротвердості поверхні ( $\Delta HV^{\text{пов.}}$ ) та глибиною модифікованого шару ( $l$ ), які технологічно забезпечували керуванням температурно-часовими й газодинамічними



параметрами насичення. Так, максимальне підвищення довговічності за циклічного та статичного навантажень технічного титану VT1-0 забезпечено за формування шару з  $\Delta HV^{пов} = 80\%$  та  $l = 20$  мкм, або  $\Delta HV^{пов} = 90\%$ ,  $l = 50$  мкм за насичення азотом або вуглецем відповідно.

- ✓ Встановлено температурно-часові та газодинамічні параметри насичення цирконієвих трубок зі сплаву Zr-1Nb киснем та азотом, які дали змогу підвищити їх втомну довговічність та тривалу статичну міцність. Експериментально показано, що напруження, за яких цирконієві трубки зі сплаву Zr-1Nb руйнувалися на базі 100 год у повітрі при 20 та 380°C після їх попереднього насичення киснем чи азотом на 10...14% та 7...11% відповідно вищі, порівняно з ефектом, отриманим після оброблення у вакуумі.
- ✓ Встановлені кореляційні залежності між температурно-часовими, газодинамічними параметрами оброблення та характеристиками модифікованих поверхневих шарів титанових сплавів дали змогу вирішити конкретні завдання програми імпортозаміщення деталей та виробів з титанових сплавів (шляхом модифікування робочих поверхонь низки деталей авіаційного призначення) на ДП “Луцький ремонтний завод “Мотор”.

#### **Зв’язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконана у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України в рамках цілої низки тем:

- теми відомчого замовлення НАН України “Фізико-хімічні основи підвищення циклічної та статичної міцності виробів із титанових сплавів градієнтним зміцненням поверхневих шарів металу елементами втілення (O, N, C) за термодифузійного насичення” (№ держреєстрації 0112U002790, 2012-2014 рр.), проєкту “Підвищення ресурсу виробів з цирконієвих сплавів градієнтним твердорозчинним зміцненням приповерхневого шару металу” (№ держреєстрації 0113U004219, 2013 р., № держреєстрації 0114U000815, 2014 р., № держреєстрації 0115U004011, 2015 р.), цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України “Ресурс”, проєкту “Розробка фізико-хімічних основ інженерії поверхні цирконієвих сплавів у контрольованих газових середовищах та методів оцінки ресурсу виробів активної зони” (№ держреєстрації 0116U006341, 2016 р., № держреєстрації 0116U006341, 2017 р., № держреєстрації 0118U000475, 2018 р., № держреєстрації 0119U101186, 2019 р., 2020 р.), цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України “Ресурс-2”, проєкту молодих учених НАН України за грантами НАН України на 2011-2012 рр. “Модифікування поверхні металу елементами втілення, як спосіб підвищення ресурсу виробів з титанових сплавів” (№ держреєстрації 0111U008321, 2011 р. та № держреєстрації 0112U005111, 2012 р.), в яких автор був виконавцем;



- проекту “Розробка технологічних процесів підвищення функціональних властивостей та ресурсу сучасних та перспективних оболонкових матеріалів тепловидільних елементів шляхом оброблення у контрольованих кисень-азотовмісних середовищах” (№ держреєстрації 0121U110372, 2021 р.);
- цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України “Ресурс-3”, в яких автор був співкерівником;
- теми відомчого замовлення НАН України “Інженерія поверхні металів IV групи та сплавів на їх основі термодифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C) для зменшення впливу на них водню” (№ держреєстрації 0021U108958, 2021-2023 рр.), де Труш В.С. був відповідальним виконавцем та гранту НАН України “Формування поверхневого функціонального шару з характеристиками нового рівня на титановому сплаві медичного призначення” (№ держреєстрації 0115U004312, 2015 р., № держреєстрації 0116U004955, 2016 р.), де він був керівником.

#### **Відповідність дисертації встановленим вимогам.**

Дисертаційна робота Труша В.С. “Наукові основи підвищення роботоздатності металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх сплавів дифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C)”, за оформленням цілком відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій відповідно до Наказу МОН № 40 від 12.01.2017 р. (із подальшими змінами, внесеними згідно з Наказом МОН № 759 від 31.05.2019 р.). Стиль викладу експериментальних та аналітичних результатів дисертаційної роботи є лаконічним, логічним, що забезпечує легке їх сприйняття. Дисертаційна робота написана сучасною науково-технічною мовою, послідовно, логічно і грамотно. Мета, наукова новизна, практична цінність, коротка характеристика розділів, висновки, список опублікованих праць за темою дисертаційної роботи, особистий внесок здобувача, які викладено в рефераті, відповідають змісту дисертації, реферат цілком і повністю відповідає основним положенням дисертаційної роботи.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації** автором забезпечено застосуванням сучасних методів експериментальних досліджень, статистичним обробленням отриманих експериментальних даних, графічною ілюстрацією результатів досліджень, забезпеченням та контролем параметрів процесу дифузійного насичення, узгодженістю отриманих аналітичних та експериментальних результатів з наявними результатами вітчизняних та закордонних авторів.



**Повнота викладення в опублікованих працях отриманих у роботі результатів.**

Труш В.С. за темою дисертаційної роботи опублікував 47 наукових праць, а саме: 1 україномовну монографію (видавництво «Наукова думка»), 1 розділ в англomовній монографії, 35 статей у наукових фахових виданнях України та наукових періодичних виданнях інших держав (з них 19 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Sciences), 10 у матеріалах і тезах доповідей міжнародних науково-технічних конференцій.

### **Зауваження та рекомендації до дисертації.**

1) У роботі показано, що зі зростанням тиску кисню у насичувальній камері під час модифікації за температури  $650^{\circ}\text{C}$  титанового сплаву OT4-1 відносний приріст мікротвердості поверхні знижувався, що пояснили сублімацією оксидів Mn. Однак не наведено яких саме оксидів, якого вони складу: стехіометричного чи іншого?

2) Автором наведено аналітично розраховані ефективні коефіцієнти дифузії елементів втілення в металах IV групи за температури насичення  $350\dots950^{\circ}\text{C}$ , однак не пояснено відмінності між коефіцієнтом дифузії, який відомий з літератури та, власне, обчисленим ефективним коефіцієнтом дифузії.

3) В дисертації зустрічаються описки та орфографічні помилки, наприклад: на стор. 76 присутній вираз “мультианалітичний підхід”, а доцільно було б написати “аналітичні підходи”

4) У роботі наведено розміри включень та їх кількість у наведеному сплаві Zr-1Nb, який попередньо модифікували киснем. Доцільним було б вказати і фазовий склад таких виділень.

5) Показано, що модифікування поверхневого шару гафнію ГФЕ-1 киснем забезпечує підвищення довговічності за чистого згину. Доцільно було перевірити і за циклічного розтягу.

6) Шрифт мірної лінійки на рис. 1.38 є занадто великий відносно основного тексту.

7) На стор. 325 наведено інформацію щодо протяжності наводнених включень сплаву Zr-1Nb після різних оброблень, однак нічого не вказано про орієнтування цих включень: вони радіальні чи тангенціальні?

Проте, наведені зауваження не зменшують наукового рівня та цінності дисертаційної роботи в цілому.

### **Висновки.**

В цілому, виходячи з аналізу матеріалів дисертаційної роботи, можна зробити такі висновки:

1 Дисертація Труша Василя Степановича, яка виконана на тему “Наукові основи підвищення роботоздатності металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх



сплавів дифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C)”, є цілком завершеною науковою працею, у якій на основі проведення експериментальних та аналітичних досліджень вирішено актуальну науково-технічну проблему, що полягає у підвищенні роботоздатності тонкостінних виробів зі сплавів на основі титану, цирконію та гафнію та зменшено їх схильність до поглинання водню.

- 2 Дисертаційна робота цілком відповідає вимогам паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.
- 3 Основні положення дисертаційної роботи повністю відображені у публікаціях здобувача.
- 4 Реферат дисертації повністю відповідає змісту дисертації.
- 5 Дисертаційна робота за актуальністю, науковою новизною та практичною цінністю відповідає вимогам п. 7 та п. 9 “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 502 від 19.05.2023 р., які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук.

Резюмуючи вище викладене, вважаю, що автор дисертації Труш Василь Степанович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01– матеріалознавство.

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, доцент,  
професор кафедри матеріалознавства  
та інженерії матеріалів  
Національного університету  
“Львівська політехніка”



Володимир КУЛИК

Підпис д.т.н. Володимира Кулика  
“ЗАСВІДЧУЮ”

Вчений секретар  
Національного університету  
“Львівська політехніка”  
к.т.н., доцент  
“03” жовтня 2024 р.



Роман БРИЛИНСЬКИЙ

Отримано: 09.10.2024

