

## **В І Д Г У К**

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 зі спеціальності  
05.02.01 - матеріалознавство

### **Актуальність теми дисертації.**

У сучасному матеріалознавстві титану, цирконію, гафнію та сплавів на їх основі зусилля провідних дослідників спрямовані на підвищення рівня експлуатаційних характеристик тонкостінних виробів завдяки створенню нових та оптимізації існуючих методів об'ємного та поверхневого їх оброблення. Серед цих методів для підвищення експлуатаційних властивостей виробів з вищезгаданих сплавів зросло зацікавлення до модифікування поверхневого шару металу різними елементами. Останнім часом чільне місце у таких дослідженнях займає модифікування елементами втілення (киснем, азотом, вуглецем). Однак на даний час недостатньо висвітлені питання щодо кінетичних закономірностей високотемпературної взаємодії сплавів на основі елементів IV групи (Ti, Zr, Hf) з киснем, азотом, вуглецем залежно від газодинамічних та температурно-часових параметрів насичення та не систематизовано даних щодо кореляції між характеристиками поверхневого шару (мікротвердість, поверхні, глибина модифікованого шару) та довговічністю за циклічних та статичних умов навантажень. Такі дані дозволили б прогнозувати роботоздатність тонкостінних виробів залежно від характеристик поверхневого шару. Також слід відмітити, що взаємодія з воднем при експлуатації впливатиме на довговічність матеріалів. Тому обробка готових виробів має підвищувати не лише довговічність за втомного та статичного навантаження, але й опірність до поглинання водню.

У зв'язку з цим окреслюється актуальна наукова проблема, яка полягає у підвищенні роботоздатності тонкостінних виробів зі сплавів на основі титану, цирконію та гафнію, в тому числі і для опірності поглинання водню, шляхом



модифікування їх поверхневих шарів дифузійним насиченням киснем, азотом, вуглецем.

На розв'язані цієї проблеми і направлена дисертаційна робота Труша В.С.

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

- *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 ( $\Delta HV^{пов.}$ ) 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.

- *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  $\Delta HV^{пов.} = 80\%$  та вуглецем на  $\Delta HV^{пов.} = 90\%$  сприяло формуванню впорядкованої дислокаційної структури у вигляді або плоских скупчень, або петель відповідно.

- *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.

- *Вперше* встановлено характеристики поверхневого модифікованого шару ( $\Delta HV^{пов.}$ ,  $l$ ) цирконієвого сплаву Zr-1Nb, сформованого дифузійним насиченням киснем ( $\Delta HV^{пов.} = 60\%$ ,  $l = 30$  мкм), азотом ( $\Delta HV^{пов.} = 80\%$ ,  $l = 35$  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.

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

Дисертація складається зі вступу, 6 розділів (літературний огляд, методичні аспекти роботи та чотирьох розділів результатів досліджень), висновків, списку літератури (265 найменувань) та 2 додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи 394 сторінки, в тому числі 230 рисунків, 80 таблиць. Основний зміст дисертаційної роботи викладено на 302 сторінках. Загальна структура дисертації є логічною оптимальною за кількістю з точки зору кількості підрозділів, легко читається та сприймається.

У **вступі** наведено та систематизовано результати вітчизняних та закордонних вчених-матеріалознавців щодо впливу елементів втілення на фізико-механічні властивості титанових, цирконієвих та гафнієвих сплавів; визначено актуальність обраної наукової теми, сформульовано мету роботи, представлено завдання, які треба вирішити для досягнення поставленої мети; показано апробацію досліджень; представлено список публікацій дисертанта за темою дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Модифікування металів IV групи (Ti, Zr, Hf) елементами втілення (O, N, C) та вплив насичення воднем на їх характеристики» дисертантом наведено огляд науково-технічної літератури, який обґрунтував вибір тематики дисертаційних досліджень. Аналізу підлягали дослідження, що стосувалися впливу елементів втілення на низку фізичних та механічних властивостей.

У **другому розділі** «Основні методичні аспекти роботи» подано інформацію про досліджувані матеріали, режими хіміко-термічного оброблення, методи та обладнання для механічних випробувань, представлено методику акустичної емісії цирконієвих зразків зі сплаву Zr-1Nb під час розтягу.

У **третьому розділі** «Кінетичні закономірності високотемпературної взаємодії металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх сплавів з елементами втілення (O, N, C)» наведено зміну маси та фазово-структурний стан зразків з досліджуваних



матеріалів залежно від параметрів дифузійного насичення киснем, азотом та вуглецем.

У **четвертому розділі** «Вплив параметрів термодифузійного насичення на характеристики поверхневого шару сплавів на основі Ti, Zr, Hf» наведено мікротвердість поверхні та глибину поверхневого шару модифікованого елементами втілення, представлено результати нанодюрOMETричних досліджень поверхні технічного титану VT1-0 після насичення киснем та азотом, показана морфологія азотованого титану VT1-0, аналітично оцінено глибину модифікованого шару та ефективних коефіцієнтів дифузії у випадку однокомпонентного дифузійного насичення металів IV групи азотом, киснем і вуглецем.

У **п'ятому розділі** «Експлуатаційний ресурс металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та сплавів на їх основі з модифікованими поверхневими шарами» наведено довговічність досліджуваних матеріалів за різних умов навантаження, зокрема симетричного чистого згину, циклічного розтягу, тривалого статичного навантаження як за кімнатної, так і підвищеної температури; представлено еволюцію дислокаційна структури модифікованого шару титану VT1-0 дифузійно насиченого азотом та вуглецем; запропоновано методику вибору параметрів дифузійного насичення титанових сплавів киснем для досягнення заданої мікротвердості поверхні та глибини модифікованого шару.

У **шостому розділі** «Підвищення опірності до насичення водню титанових, цирконієвих, гафнієвих сплавів за наявності модифікованого поверхневого шару» подано характеристики насичених воднем металів IV групи та сплавів на їх основі за наявності поверхневого модифікованого шару; наведено вплив деформації на насичення воднем сплавом Zr-1Nb після насичення киснем та азотом; наведено вміст водню у сплавів Zr-1Nb а попереднього дифузійного насичення киснем, азотом та без насичення.

У **висновках** дисертантом сформульовано основні результати проведених дисертаційних досліджень, а у додатках містяться акти про впровадження результатів дисертаційних досліджень.

Дисертація є завершеною науковою працею.



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

Дисертаційна робота виконувалася у відділах високотемпературної міцності конструкційних матеріалів у рідкометалевих і газових середовищах та матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України у рамках цілої низки тем, а саме: 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, проєкту «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. Крім того, Труш В.С. був відповідальним виконавцем 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.) та керівником гранту НАН України «Формування поверхневого функціонального шару з характеристиками нового рівня на титановому сплаві медичного призначення» (№ держреєстрації 0115U004312, 2015 р., № держреєстрації 0116U004955, 2016 р.).

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Отримані у роботі експериментальні та аналітичні результати та висновки у повній мірі викладено в наукових публікаціях як вітчизняних, так і міжнародних журналах за профілем, що відповідає профілю дисертації. Міжнародні журнали включені у науково-метричну базу SCOPUS, що підтверджує високий рівень отриманих результатів досліджень та їх достовірність. Тому це дає підстави для можливості застосування отриманих результатів для реальних тонкостінних виробів, що служить підсилюючим фактором обґрунтованості основних наукових положень і висновків.

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

Одержані у дисертації експериментальні та аналітичні результати є істотним внеском у розуміння високотемпературної взаємодії металів IV групи періодичної системи хімічних елементів. Адже отримані результати дають можливість, задавши температуру, тривалість дифузійного насичення елементами втілення формувати задані характеристики поверхневого шару (мікротвердість поверхні, глибина модифікованого шару). Область застосування отриманих результатів охоплює високотехнологічні галузі промисловості, де є потреба у використанні тонкостінних виробів з досліджуваних матеріалів.

**Апробація дисертації та повнота її викладу в опублікованих працях.** Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно та були представлені на вітчизняних та міжнародних науково-технічних конференціях матеріалознавчого профілю. В повному обсязі дисертаційна робота доповідалась та обговорювалась на науково-кваліфікаційному семінарі “Проблеми



матеріалознавства та інженерії поверхні металів” Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України. За темою дисертації опубліковано 47 наукові праці, з них 1 монографія, 1 розділ в англійській 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. Індекс Гірша автора (h-index) становить 9.

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

Дисертаційна робота Труша В.С., яка виконана на тему «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 лаконічно побудований, 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. У матеріалах дисертації не було виявлено ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації.

### **Зауваження та побажання до дисертаційної роботи.**

1. У роботі зустрічаються два терміни: «дифузійне насичення» і «термодифузійне насичення». Виникає питання: це два різні методи насичення? Якщо так, то в чому полягають відмінності?

2. У роботі наведено номограми для вибору параметрів дифузійного насичення киснем лише для титану, а для цирконію та гафнію – відсутні. Доцільно було б навести номограми для всіх металів IV групи.



3. Зустрічаються описки тексту, нумерація рисунків, наприклад, після рис. 5.30 наступний рисунок 5.33.

4. У дисертації не обґрунтовано чому для дослідження розподілу мікротвердості поверхневого шару досліджуваних матеріалів було використано скісний, а не прямий шліф.

5. На стор. 65 замість українських одиниць вимірювань «мкм» вжито англійські позначення  $\mu\text{m}$ .

6. На стор. 248 при описі топографії технічного титану VT1-0, зокрема сказано, що поверхні є мікроподряпини. Однак не вказано їх геометричні розміри (глибина, довжина тощо). Чи досліджував дисертант геометричні розміри мікроподряпин?

7. На стор. 263 наведено рис. 4.65 в, а на стор 262 а та б цього рисунку, однак без назви рисунку. Доцільно було б розбити на два окремі рисунку та зробити два окремі підписи.

Зроблені зауваження не впливають на високу загальну оцінку дисертаційної роботи і не зменшують ступеня важливості основних її результатів та висновків.

### **Висновки.**

В цілому, вважаю дисертаційну роботу Труша Василя Степановича а цілісним та завершеним дослідженням, в якому вирішена нова і важлива науково-технічна проблема підвищення довговічності тонкостінних виробів з сплавів на основі Ti, Zr, Hf за циклічних та статичних тривалих навантажень завдяки формуванню регламентованого модифікованого поверхневого шару дифузійним насиченням киснем, азотом, вуглецем. Текст дисертаційної роботи оформлено відповідно до чинних вимог, виклад змісту дисертації грамотно структурований та представлений на належному науковому рівні. Реферат дисертаційної роботи цілковито відповідає змісту дисертації та в повній мірі відображає її основні положення.

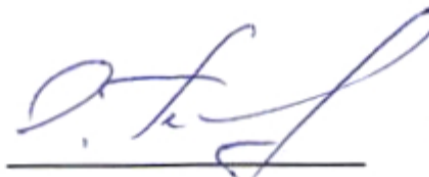
За обсягом виконаних досліджень, новизною отриманих результатів, їх теоретичним та практичним значенням дисертаційна робота на тему „Наукові основи підвищення роботоздатності металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх сплавів дифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C)” відповідає вимогам п. 7



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., а її автор Труш Василь Степанович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктор технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

**Офіційний опонент,**

доктор технічних наук,  
професор,  
професор кафедри  
прикладної механіки та  
мехатроніки  
Луцького національного  
технічного університету



**Олександр ПОВСТЯНОЙ**



**ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ:**  
Учений секретар  
ЛУЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
професор Алла ЗЕМКО



Отримано:  
08.10.2024 