

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

зі спеціальності 05.02.01 - матеріалознавство.

Актуальність теми дисертації.

Сучасний рівень розвитку науки і техніки висуває високі вимоги до експлуатаційних властивостей, роботоздатності, надійності і довговічності металевих виробів, які використовують в різних галузях промисловості (авіаційна, енергетична, машинобудівна тощо). Запорукою стрімкого розвитку є використання металів IV групи (титану, цирконію й гафнію) та сплавів на їх основі. Важливим чинником збільшення роботоздатності таких виробів є висока довговічність за тривалих циклічних та статичних навантажень, що значною мірою залежить від структурно-фазового стану поверхневого шару. Тому характеристики поверхневих шарів цих матеріалів повинні відповідати високим вимогам. Це у свою чергу зумовлює розроблення інноваційних або оптимізацію існуючих методів поверхневого оброблення.

Дифузійне насичення елементами втілення (киснем, азотом, вуглецем) прийнято вважати одним із ефективних методів керування, зокрема структурно-фазовим станом та мікротвердістю, а відтак і фізико-механічними характеристиками. Однак, існуючі на сьогодні результати досліджень, що мають місце у науково-технічній літературі, орієнтовані на дослідження впливу об'ємного легування елементами втілення на експлуатаційні властивості, що унеможлиблює їх застосування до готових виробів. Тому постає проблема встановлення кореляційних залежностей між параметрами дифузійного насичення (тривалість, температура тощо) та характеристиками поверхневого шару (мікротвердість, глибина модифікованого шару) та ресурсними характеристиками.

Розроблення наукових основ підвищення роботоздатності сплавів на основі Ti, Zr, Hf, а саме довговічності за дії тривалих циклічних та статичних навантажень завдяки використанню поверхневого дифузійного насичення O, N, C є актуальною науково-технічною проблемою сучасного матеріалознавства, вирішення якої розширить діапазон застосування цих сплавів.

Таким чином, вважаю, що 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,)», яка присвячена розв'язанню цієї важливої науково-технічної проблеми, є актуальною і має важливе науково-практичне значення.

Дана дисертаційна робота є новим етапом у розвитку та застосування дифузійного насичення поверхневих шарів металів IV (титану, цирконію, гафнію) та сплавів на їх основі елементами втілення (киснем азотом, вуглецем) для підвищення довговічності за циклічного та статичного навантажень.

Оцінка змісту та завершеності дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку літератури (265 найменувань) та 2 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 394 сторінки, в тому числі 230 рисунків, 80 таблиць. Основний зміст дисертаційної роботи викладено на 302 сторінках. Загальна структура дисертації є логічно вибудована і послідовно розкриває основний зміст експериментальних та аналітичних результатів досліджень.

У дисертації викладені наукові положення, висновки та рекомендації у повній мірі обґрунтовані та підтверджені експериментально.

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

У **першому розділі** наведено результати досліджень закордонних і вітчизняних вчених щодо високотемпературної взаємодії елементів втілення (кисню, азоту, вуглецю) з металами IV групи та сплавами на їх основі. На основі викона-

ного аналізу обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету, визначено задачі досліджень та напрями їх вирішення.

У **другому розділі** викладено основні методичні аспекти дисертаційної роботи, а саме дані про досліджувані матеріали, схеми та устаткування для насичення, використані методи випробувань та досліджень.

У **третьому розділі** представлено кінетичні залежності приросту питомої маси титанових, цирконієвих, гафнієвих сплавів та фазового складу їх модифікованої поверхні за дифузійного насичення киснем, азотом та вуглецем залежно від конкретних параметрів оброблення (температура, тривалість насичення та тиск насичувального середовища).

У **четвертому розділі** наведено результати дослідження впливу температури, тривалості оброблення у газових середовищах на мікротвердість, глибину модифікованого шару, структуру, топографію поверхневих шарів металів Ti, Zr, Hf та сплавів на їх основі, модифікованих киснем, азотом, вуглецем та наведено аналітично розраховані ефективні коефіцієнти дифузії елементів втілення в металах IV групи.

У **п'ятому розділі** наведено вплив модифікування поверхневого шару киснем, азотом та вуглецем довговічність за циклічного та статичного тривалого навантажень за двох температур (20 та 380°C); представлено фрактографічні особливості руйнування та еволюцію дислокаційної структури модифікованого шару технічного титану VT1-0 залежно від $\Delta HV^{пов}$; обґрунтовано режим оброблення титанових та цирконієвих сплавів киснем для забезпечення високої довговічності; показано природу процесів руйнування трубок із сплаву Zr-1Nb, використавши для цього метод акустичної емісії.

У **шостому розділі** представлено закономірності взаємодії поверхневих шарів титанових, цирконієвих, гафнієвих сплавів, модифікованих елементами втілення, з воднем та оцінено ефективність їх захисту. Запропоновано концепцію підвищення роботоздатності виробів металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та сплавів на їх основі за статичних та циклічних навантажень.

У **висновках** сформульовано основні результати проведених дисертаційних досліджень.

Наукова новизна дисертаційних досліджень.

Основні результати, що складають наукову новизну дисертаційної роботи полягають у наступному:

- *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.
- *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.
- *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 ($\Delta HV^{\text{пов.}}$, 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°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.

Отримані в дисертаційній роботі результати досліджень, мають важливе наукове та прикладне значення. Їх можна використовувати, наприклад, для контролю якості виробів з титану, цирконію та гафнію за мікротвердістю на їх поверхні та прогнозування градієнту мікротвердості та структури у їх поверхневих шарах залежно від використаних параметрів оброблення (температура, тривалість та тиску насичувального середовища) та для досягнення їх оптимального зміцнення, щоб гарантувати безвідмовну роботоздатність у пріоритетних галузях України (енергетика, авіація).

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 виконувалася у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України в рамках низки тем, зокрема: 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 був відповідальним виконавцем; 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 був керівником; 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», де був співкерівником; проекту «Підвищення ресурсу виробів з цирконі-

євих 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.), де був виконавцем.

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

Отримані у дисертаційній роботі наукова новизна та практичне значення одержаних досліджень, висновки повною мірою опубліковано у вітчизняних науково-фахових та міжнародних журналах, включених у міжнародну науково-метричну базу даних Scopus та Web of Sciences та апробовано на міжнародних науково-технічних конференціях. Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено дотриманням правил застосування сучасних методів експериментальних досліджень, точністю вимірювання, статистичним обробленням отриманих експериментальних даних, графічною ілюстрацією результатів досліджень, забезпеченням та контролем параметрів процесу дифузійного насичення. Це все дає підстави для застосування отриманих результатів для реальних тонкостінних виробів з досліджуваних матеріалів.

Повнота викладення в опублікованих працях отриманих у роботі результатів.

Отримані наукові результати, що складають зміст дисертаційної роботи, у повній мірі відображені у публікаціях дисертанта у наукових англійських і пе-

ревідних міжнародних журналах, що є передовими за профілем роботи., зокрема у таких як: «Materials Performance and Characterization», «Materials Science», «Physics and Chemistry of Solid State. Section: Physics», «Problems of Atomic Science and Technology», «Nuclear Physics and Atomic Energy».

Значимість предмету дослідження підкріплена також участю дисертанта у міжнародних наукових конференціях, що відповідають напрямкам досліджень представленої дисертаційної роботи.

За темою дисертаційної роботи опубліковано 47 наукових праць, з них 1 монографія, 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.

Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертаційна робота 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)» за оформленням відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій відповідно до Наказу МОН № 40 від 12.01.2017 р. (із змінами, внесеними згідно з Наказом МОН № 759 від 31.05.2019 р.).

У матеріалах дисертації не було виявлено ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації.

Стиль викладу матеріалів дисертаційної роботи є логічним, речення в основному побудовано лаконічно та без перевантажень, що забезпечує легке сприйняття. Для написання дисертації використано сучасну науково-технічну мову.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. У дисертаційній роботі зазначено, що наявність поверхневих шарів модифікованих киснем та азотом на сплаву Zr-1Nb зменшують кількість поглинутого водню з 900 до 270 ppm. Варто би було навести аналогічні дані щодо технічного титану VT1-0.

3. У тексті дисертації зустрічається термін і «титан VT1-0», і термін «технічний титан VT1-0» (стор. 124, стор. 140, стор. 141, стор.17). Доцільно вживати якийсь один термін.

2. Незначна кількість технічних помилок (що, ймовірно, виникли при комп'ютерному наборі тексту, наприклад див стор. 278: міжрядковий інтервал підпису рис. 5.10 є одиниця, а основного тексту півтора.

4. Дисертантом наведено апробацію методу акустичної емісії для контролю стану модифікованого поверхневого шару на трубках зі сплаву Zr-1Nb. Однак у роботі не обґрунтовано чому для цього методу обрано саме трубки, а не інший тип зразків.

5. Доцільно було б окрім узагальненого рисунку щодо вмісту фаз на поверхні технічного титану VT1-0, сплавів Zr-1Nb та ГФЕ-1 навести окремо дифракційні спектри досліджуваних матеріалів за найнижчої та найвищої температури азотування.

6. Для кращого сприйняття зміни параметрів кристалічної ґратки різних фаз досліджуваних матеріалів після азотування необхідно було б подати їх не у вигляді пелюсткових діаграм, у вигляді гістограм.

Проте, наведені зауваження не зменшують наукового рівня та цінності дисертаційної роботи в цілому. Поставлена у дослідженні мета повністю досягнута, основні завдання вирішені в повному обсязі.

Висновки.

Дисертаційна робота Труша Василя Степановича на тему «Наукові основи підвищення роботоздатності металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх сплавів дифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C)» є цілісним та завершеним дослідженням, в якому вирішена нова і важлива наукова проблема, а саме – підвищено роботоздатність тонкостінних виробів зі сплавів на основі титану, цирконію та гафнію та зменшено їх схильність до поглинання водню шляхом модифікування поверхневих шарів дифузійним насиченням киснем, азотом, вуглецем. Дисертацію оформлено відповідно до чинних вимог, виклад змісту є чітко структурований та поданий на високому науковому рівні. Ця праця є хорошим продовженням робіт наукової школи матеріалознавців Фізико-механічного інституту

ім. Г.В. Карпенка НАН України, які займаються титаном. За своїм змістом матеріали дисертаційної роботи повністю відповідає вимогам паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство. Реферат дисертації відповідає змісту дисертаційної роботи та повною мірою відображає її основні наукові та практичні положення. Представлена до захисту дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні, є цілісною та завершеною.

В цілому вважаю, що дисертаційна робота за своєю актуальністю, повнотою викладення, науковою новизною та практичною цінністю отриманих результатів дослідження повністю відповідає вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме 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, доцент,
професор кафедри фізичного
матеріалознавства та термічної
обробки Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Тетяна ЛОСКУТОВА

Підпис д.т.н., доцента, професора Тетяни ЛОСКУТОВОЇ

Затверджую

Учений секретар Національного
технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
к.т.н., доцент



Валерія ХОЛЯВКО

Отримано:
09.10.2024 р.